

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра теоретичної електротехніки**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка**

**на тему: «Апроксимація вольт-амперної характеристики  
обмежувачів перенапруг нелінійних»**

Виконав :

студент VI курсу, групи ЕВ-71мп

Філіпп Гліб Дмитрович \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к. т. н., Троценко Є. О. \_\_\_\_\_

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О. \_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра теоретичної електротехніки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

\_\_\_\_\_ О. А. Філонова

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Філіппу Глібу Дмитровичу**

1. Тема дисертації «Апроксимація вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних», науковий керівник дисертації Троценко Євгеній Олександрович, к.т.н, доцент, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4107-с
2. Термін подання студентом дисертації: грудень 2018.
3. Об'єкт дослідження: нелінійні обмежувачі перенапруг.
4. Вихідні дані: динамічні моделі обмежувачів перенапруг нелінійних; набір випробних обмежувачів перенапруг нелінійних з каталогу.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити моделі обмежувача перенапруг нелінійного, що запропонована на кафедрі «Техніки та електрофізики високих напруг» КПІ ім. Ігоря Сікорського, удосконалити запропоновану моделі, порівняти з існуючими моделями, дослідження роботи паралельних ОПН, робота ОПН при впливі синусоїдальної напруги.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація на тему магістерської дисертації.
7. Орієнтовний перелік публікацій: 4 публікації.

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольтного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

## 9. Дата видачі завдання 3 вересня

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Уточнення завдання на виконання	07.09.18	
2	Написання магістерської дисертації	12.12.2018	
3	Отримання відгуку наукового керівника	13.12.2018	
4	Попередній внутрішній захист магістерської дисертації на кафедрі	13.12.2018	
5	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення роботи	18.12.2018	
6	Отримання зовнішньої рецензії, подання магістерської дисертації на кафедру, допуск до захисту	19.12.2018	
7	Захист магістерської дисертації	20.12.2018	

Студент

Г. Д. Філіпп

Науковий керівник дисертації

Є. О. Троценко

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки. Пояснювана записка виконана на 153 сторінки формату А4, яка включає в себе: 153 сторінок, 90 рисунків, 29 таблиць.

Ключові слова: обмежувачі перенапруг нелінійні; схемо-технічне моделювання; вольт-амперна характеристика; залишкова напруга; високовольтне обладнання; апроксимація вольт-амперної характеристики; змінна напруга.

У даній магістерській дисертації розглянуто питання апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг та проведено моделювання обмежувачів перенапруг в середовищі Micro-Cap Evaluation Version

**Актуальність теми.** Обмежувачі перенапруг залишаються одними із найважливіших засобів захисту високовольтного обладнання від впливу на них грозових та комутаційних перенапруг. Для того, щоб захисний ефект був максимальний, необхідно правильно підбирати, розраховувати параметри обмежувача перенапруг та моделювати вплив перенапруг для відповідного електричного апарату. Тому розвиток та впровадження нових методів моделювання на частотно-залежних моделях обмежувачів перенапруг являється актуальною задачею.

**Метою магістерської дисертації** є дослідження спрощених моделей обмежувачів перенапруг нелінійних запропонованих на кафедрі «Техніки та електрофізики високих напруг» з використанням методу апроксимації вольт-амперної характеристики та порівняння з існуючими методами та схемотехнічними моделями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- перетворити в аналітичний вигляд апроксимацію вольт амперної характеристики;
- змоделювати за допомогою нового методу моделі обмежувачів перенапруг;

- побудувати графіки значень залишкової напруги для випробних моделей;
- порівняти та проаналізувати отримані результати.

**Об'єкт дослідження:** - обмежувачі перенапруг нелінійні.

**Предмет дослідження** – метод апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг.

**Методи дослідження.** Основою даної роботи є моделювання обмежувачів перенапруг за допомогою різних методів розрахунку їх параметрів. Обробка результатів проводилася в SPICE – подібній комп'ютерній програмі Micro-Cap. Допоміжні програми: Microsoft Office Word 2013, Microsoft Office Excel 2013.

**Наукова новизна** полягає в дослідженні нових моделей обмежувачів перенапруг завдяки методу апроксимації вольт амперної характеристики.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of an explanatory note. The explanatory note is made on 153 pages of the format A4, which includes 153 pages, 90 drawings, 29 tables.

**Key words:** non-linear surge arresters; circuit-engineering modeling; current-voltage characteristic; residual voltage; high-voltage equipment; approximation of the current-voltage characteristic; alternating voltage.

In this master's dissertation, the questions of approximation of the voltage-ampere characteristic of overvoltage surge arresters are considered and the surge arresters are simulated in the Micro-Cap Evaluation Version environment.

**Actuality of theme.** Surge arresters remain one of the most important means of protecting high-voltage equipment from the effects of lightning and switching overvoltages on them. In order for the protective effect to be maximal, it is necessary to select correctly, calculate the parameters of the surge arresters and simulate the effect of overvoltage for the electric apparatus. Therefore, the development and introduction of new modeling techniques on frequency dependent models of surge arresters is an urgent task.

**The purpose of the master's thesis** is to study the simplified models of non-linear surge arresters ones proposed at the Department of "High Voltage Engineering and Electrophysics" using the method of approximation of the current-voltage characteristic and comparison with existing methods and circuit engineering models.

To achieve this **goal**, the following tasks must be solved:

- To convert in an analytical form a current-voltage approximation characteristics;
- simulate with a new method of surge arresters model;
- construct graphs of residual voltage values for test models;
- compare and analyze the results.

**Object of research:** non-linear surge arresters.

**Subject of research** - the method of approximation current-voltage characteristics of surge arresters.

**Research methods.** The basis of this work is the simulation of surge arresters using various methods for calculating their parameters. The results were processed in SPICE- shaped computer program Micro-Cap. Auxiliary applications: Microsoft Office Word 2013, Microsoft Office Excel 2013.

**The scientific novelty** is the study of new models of overvoltage limiters due to the method of approximation of the volt-ampere characteristics.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	12
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБМЕЖУВАЧІ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНІ.....	13
1.1. Призначення ОПН.....	13
1.2. Види ОПН.....	16
1.3. Основні характеристики ОПН.....	17
1.4. Висновки по розділу 1.....	18
2. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО, ЩО ЗАПРОПОНОВАНА НА КАФЕДРІ ТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ НАПРУГ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО .....	20
2.1. Апроксимація вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних .....	20
2.2. Модель обмежувача перенапруг нелінійного, що запропонована на кафедрі «Техніки та електрофізики високих напруг» КПІ ім. Ігоря Сікорського та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version.....	25
2.3. Висновки по розділу 2.....	34
3. УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО, ЩО ЗАПРОПОНОВАНА НА КАФЕДРІ ТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ НАПРУГ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО.....	35
3.1. Удосконалення моделі обмежувача перенапруг нелінійного, що запропонована на кафедрі техніки та електрофізики високих напруг КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	35
3.2. Порівняння результатів моделі ОПН до і після удосконалення та з іншими існуючими моделями ОПН.....	45
3.3. Моделювання схем ОПН при впливі на них імпульсів напруги з використанням апроксимації вольт-амперної характеристики.....	70



3.4. Дослідження ефективності двох обмежувачі перенапруг нелінійних, установлених паралельно .....	108
3.5. Дослідження впливу синусоїдальної напруги на роботу обмежувача перенапруг нелінійного.....	126
3.6. Висновки по розділу 3.....	131
4. СТАРТАП – ПРОЕКТ. ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ АПРОКСИМАЦІЇ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ ТА ВИКОРИСТАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ ОПН.....	133
ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ІП – іскровий проміжок

РВ – вентиляний розрядник

ОПН– обмежувач напруг нелінійних

ОПНІ – обмежувач напруг нелінійний з іскровим проміжком

ПЛ - повітряна лінія

АПВ - автоматичне повторне включення

**Пояснювальна записка  
до магістерської дисертації**

на тему: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

## ВСТУП

Нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) використовують для підтримки необхідного рівня захисту ізоляції від грозових та комутаційних перенапруг на станціях та підстанціях та мереж на напругу від 6 до 750 кВ.

Питання вибору та покращення роботи ОПН залишається актуальним і по сьогодні. Якщо підібрати правильні характеристики ОПН, можна досягти його максимальної ефективності. Залишається одна проблема, правильно розрахувати перехідні процеси на ізоляції в електрообладнанні під час грозових перенапруг.

Для моделювання використовують різні методи та засоби. Тому постає питання створення нових більш сучасних моделей та алгоритмів моделювання.

При створенні нових моделей потрібно враховувати складність фізичних процесів, що проходять в ОПН під час ударів блискавки.

Дослідження та порівняння нових та існуючих методів дослідження та моделей ОПН залишається актуальною задачею.

## **1.ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБМЕЖУВАЧІ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНІ**

### **1.1 Призначення ОПН**

Нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) призначені для захисту ізоляції електричного устаткування станцій та підстанцій та електричних мереж від різних типів перенапруг, а саме: атмосферних і короткочасних комутаційних перенапруг. Цей процес здійснюється в залежності до їх вольт-амперної характеристики та пропускної здатності.

На сьогоднішній день в основному використовуються розрядники з опором, нелінійна характеристика яких недостатня, аби забезпечувати необхідний рівень захисту обладнання [1].

Для більш глибокого зниження перенапруг необхідно зменшувати значення нелінійного послідовного опору, зміна якого призведе до суттєвого підвищення супроводжуваних струмів.

Без використання іскрових проміжків неможливо включити нелінійний опір на робочу напругу із-за впливу великого струму, що проходить через нелінійний опір на фазній напрузі. Крім того виникають нові проблеми, що пов'язані з необхідністю зниження супроводжувачого струму до значення, які надійно будуть відключатися проміжками [1].

Для захисту одиниць обладнання від перехідних процесів, що відбуваються на підключеному проводі, обмежувач перенапруги підключений до провіднику безпосередньо перед його входом в устаткування. Пристрій захисту від перенапруг також підключається до заземлення і функціонує за допомогою перенаправлення енергії від напруги на землю, якщо це відбувається, при відключенні провідника від землі при нормальних робочих напругах. Зазвичай це досягається за рахунок використання варистору, який має істотно різні протидії при різних напругах.

Особливість принципу роботи ОПН полягає в тому, що він побудований на різко нелінійній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) опорів (варисторів), це власне нелінійна залежність струму від напруги[1]. При прикладанні робочої фазної напруги мережі на обмежувач перенапруг у нормальному режимі в опорі обмежувача протікає струм провідності, значення якого становить доли міліампер. Під час перенапруг струм у варисторах різко підвищується, а енергія, що виділяється при перенапругах, у вигляді тепла розсіюється в пристрої та в заземлюючому ланцюзі. Тому можна сказати, що для безаварійної та безвідмовної роботи ОПН потрібно, щоб через бокову поверхню тепловий вихід проходив інтенсивніше ніж всередині у варисторах [2].

Під час повторних комутаційних та грозових перенапруг ОПН встигає знизити температуру та перейти знову у нормальний робочий режим. Під час квазістаціонарних перенапруг призводять до багаторазового спрацювання пристрою за дуже малий проміжок часу. Власне цього часу не вистачає до повного охолодження опору ОПН. Тому можна зробити висновок, що ОПН призначені для захисту ізоляції електрообладнання від впливу грозових та комутаційних перенапруг, але не від квазістаціонарних.

Зовнішня ізоляція застарілих вентиляльних розрядників в основному виготовлена з фарфору, в той час в ОПН використовуються полімерні матеріали. До основних переваг полімерної ізоляції належать:

- підвищена гідрофобність (внаслідок чого зменшується ймовірність перекриття);
- низький рівень вибухонебезпечності;
- низька вага;
- можливість роботи в умовах будь якого клімату та рівня забрудненості;
- широкий спектр робочих температур [1].

Використання в конструкції ОПН полімерної ізоляції дозволило здешевити та спростити захисний апарат. А його вибухобезпечність зумовила широке використання в сфері енергетики

Кількість ОПН необхідних для захисту лінії електропередачі приблизно дорівнює кількості опор лінії. Але аналогічних засобів захисту електрообладнання не існує, тому ОПН знаходять велике застосування на лініях електропередач [2].

В магістерській дисертації досліджуватиметься ОПН з полімерною ізоляцією типу PEXLIM Q різних модифікацій призначений на напруги 110 – 420 кВ (рис. 1.1.1). ОПН був взятий із каталогу фірми «ABB» [3].



Рис.1.1.1 Обмежувачі перенапруг на напругу 110 – 420 кВ (зліва направо) типу: PERLIM Q, PERLIM P, HS PEXLIM P-T [3].

## 1.2. Види ОПН

До основних типів ОПН належать [4]:

- без зовнішнього іскрового проміжку (Рис.1.2.1);
- із зовнішнім іскровим проміжком (Рис.1.2.2).

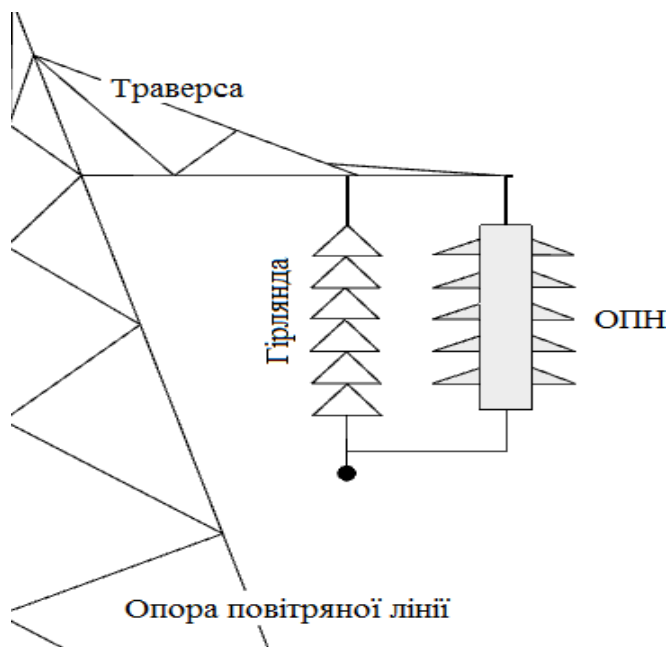


Рис.1.2.1. Один із варіантів приєднання ОПН без іскрового проміжку до опори

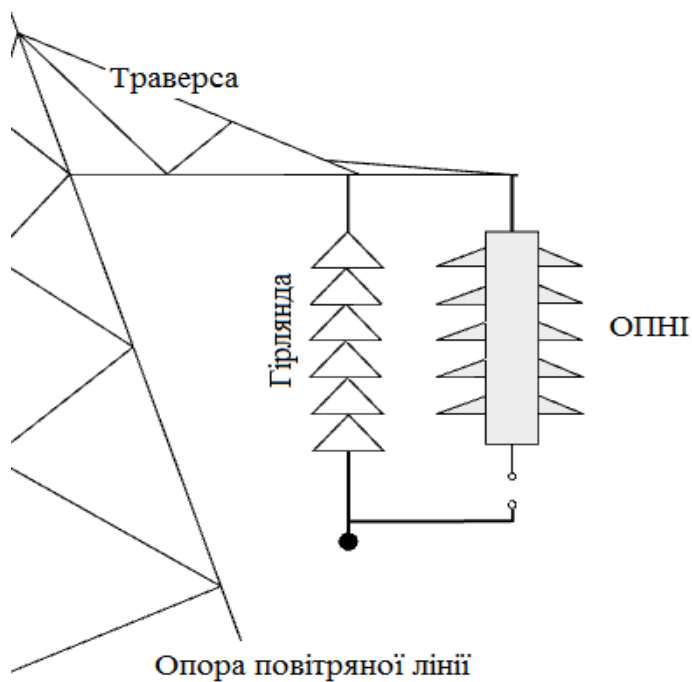


Рис.1.2.2. . Один із варіантів приєднання ОПН з іскровим проміжком до опори



Першими ОПН були створені без іскрового проміжку. Тоді вважалося, що відсутність даного проміжку є перевагою ОПН, тому що помилки отримані в результаті його розрахунку були знехтувані та спрощували конструкцію пристрою [1].

Після впровадження ОПН для захисту повітряних ліній, крім розподільчих пристроїв постало питання, в здешевленні апаратів.

З впровадженням в ОПН іскрового проміжку (ІП), було досліджено, що знижується вплив напруги на нелінійні елементи ОПН, що в свою чергу сприяє можливості зниження висоти колонки [2].

Недоліком ОПНІ являється низька енергоємність елементів оскільки наявність іскрового проміжку не завжди допомагає ОПН, що знаходяться поблизу аби розсіяти струм блискавки. Із-за цього ОПН без іскрового проміжку більш ефективний і має підвищену надійність [1].

Обмежувачі перенапруг з іскровим проміжком, зазвичай мають жорстке кріплення. Після порушення цілісності ОПНІ на ЛЕП виникають місця, де електрична міцність послаблена. Під час ремонту та відновлювальних робіт на лінії електропередачі не завжди можна виявити пошкоджений ОПН, бо на зовнішній вигляд ОПНу це не впливає[5].

ОПН без іскрового проміжку можливо приєднати до опори за допомогою спеціального пристрою, а саме віддільника [5].

### **1.3. Основні характеристики ОПН**

Нижче наведено основні характеристики обмежувачів перенапруг [5]:

- Найбільша робоча напруга - це максимальне значення напруги промислової частоти, що впродовж необмеженого часу довго може бути докладено до захищаємого апарату (при нарузі більшій, ніж найбільша робоча, при якій струм через ОПН починає помітно зростати, що може привести перегріву і пошкодження апарату) [6];

- Залишкова напруга - значення напруги, що виникає на клеммах ОПН коли через нього протікає розрядного струму ;
- Номінальний розрядний струм - максимальне значення струму, що характеризує властивості ОПН під час грозових перенапруг [5];
- Пропускна спроможність – рівень енергії, отримана ОПН [1];

Клас пропускної спроможності ( за амплітудою прямокутних імпульсів тривалістю 2000 мкс) можна подати у вигляді Таблиці 1.

Таблиця 1. Пропускна спроможність ОПН [6].

Клас	Максимальний струм, А
1	250-400
2	401-750
3	751-1100
4	1101-1600
5	1601-2100

#### 1.4. Висновки по розділу 1

Обмежувачі перенапруги відносять до високовольтних апаратів. До головних цілей та призначення ОПН являється захист ізоляції електричних систем та обладнання на повітряних лініях (ЛЕП), відводячи залишкову напругу, що виникла в результаті грозових чи комутаційних перенапруг, до землі .

Роботу ОПН можна описати трьома складовими:

- стаціонарний режим – коли прикладена робоча напруга мережі. Особливість вольт-амперної характеристики ОПН в тому, що струм який проходить через нелінійний резистор настільки малий

(мкА), що на впливає на роботу електричний кіл в яких він використовується;

- виникнення перенапруги – коли блискавка влучає у ЛЕП, виникає імпульс напруги;
- спрацювання – коли імпульс напруги доходить до ОПН його опір зменшується, при цьому струм збільшується в рази на долі мікро секунд. Після цього залишкова напруга відводиться у землю через ОПН.

ОПН залишається одним із найважливіших засобів захисту обладнання від дії перенапруг різних видів. Правильний розрахунок та підбір ОПН, може мінімізувати втрати від дії струму блискавки та аварійних ситуацій пов'язаних з комутаційними перенапругами.

## 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО, ЩО ЗАПРОПОНОВАНА НА КАФЕДРІ ТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ НАПРУГ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

### 2.1. Апроксимація вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних

Для розрахунку електричних явищ, таких як перенапруги та перехідні процеси необхідно відтворювати детально моделі та компоненти, якими можливо їх описати. Такими елементами можна назвати обмежувачі перенапруг також. Принцип роботи даного пристрою спирається на окремому виді вольт-амперної характеристики (ВАХ). Одним із суттєвих параметрів даної ВАХ є коефіцієнт нелінійності матеріалу, з якого зроблений варистор. Значення даного коефіцієнту залежить від струму, що проходить через нелінійний опір. На сьогодні неможливо розрахувати та досліджувати перенапруги при імпульсних струмах ОПНу, оскільки створено лише спрощені моделі ВАХ обмежувача перенапруг. В них описуються комутаційні та грозові перенапруги, а потрібно повна робоча зона [7].

Нижче представлено загальний вираз вольт-амперної характеристики ОПН:

$$U(I) = A * I^{\alpha} \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт нелінійності матеріалу, з якого створений ОПН (внутрішні резистори),  $A$  – стала, що відповідає розмірам та матеріалу випробного зразка.

Вольт-амперна характеристика ОПН представлена трьома умовними ділянками в робочому режимі та режимі обмеження перенапруг [7]:

- перша ділянка (струм  $I < 10^{-6} \text{ A}$ ) – показує роботу ОПН в нормальному робочому режимі при напрузі з частотою (50-60 Гц), та має високий коефіцієнт нелінійності ( $\alpha \geq 0,1$ ). В даній ділянці ВАХ залежить від температури та ємнісних струмів;

- друга ділянка (струм  $I = 10^{-4} - 10^4 \text{ A}$ ) – показує режим роботи ОПН при комутаційних та квазістаціонарних перенапругах. Коефіцієнт нелінійності ( $\alpha = 0,015 - 0,04$ ), відповідає незначна залежність ВАХ від температури;
- третя ділянка (параметри струму та коефіцієнт нелінійності аналогічні другій ділянці) – відповідає режиму роботи ОПН при грозових перенапругах.

Тому можна стверджувати, що коефіцієнт нелінійності  $\alpha$  залежить від струму, що протікає крізь ОПН. Значення коефіцієнтів нелінійності наведені нижче у таблиці 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів нелінійності  $\alpha$  ОПН відповідно до [7]

I, A	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	100	500	1500
$\alpha$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02- 0,03	0,03- 0,04	0,04- 0,06	0,06- 0,1	0,1

Для дослідження перенапруг необхідно розглядати ВАХ в аналітичному вигляді, що буде однаковий для будь якої ділянки, а саме комутаційних та грозових перенапругах.

В даній магістерській дисертації буде розглянуто вибірку обмежувачів перенапруг фірми АВВ серії PERLIM Q [3] з напругою мережі 24 – 420 кВ (ОПН класом напруги від 3 до 24 кВ в даному розділі не розглядаються), параметри яких будуть використовуватись при моделюванні та апроксимації ВАХ обмежувачів перенапруг.

Таблиця 3. Паспортні дані досліджуваних обмежувачів напруг [3]

Клас мережі, кВ	Клас напруги ОПН, кВ	Залишкова напруга при хвилях струму різної амплітуди та форми , кВ						
		30/60 мкс			8/20 мкс			
		0,5 кА	1 кА	2 кА	5 кА	10 кА	20 кА	40 кА
24	24	46,1	47,6	49,5	53,6	56,4	62,1	69,4
36	36	69,2	71,4	74,2	80,4	84,6	93,1	105
52	51	98	102	105	114	120	132	148
72	66	127	131	136	148	156	171	191
100	96	185	191	198	215	226	249	278
123	120	231	238	248	268	282	311	347
145	138	265	274	285	309	325	357	399
170	150	288	298	309	335	353	388	434
245	210	404	417	433	469	494	543	608
	216	415	428	445	483	508	559	625
	219	421	434	451	489	515	567	634
	222	427	440	458	496	522	574	642
	228	438	452	470	510	536	590	660
300	216	415	428	445	483	508	559	625
	240	461	476	495	536	564	621	694
	258	496	512	532	576	607	667	746
	264	507	523	544	590	621	683	764
	276	530	547	569	617	649	714	798
362	258	496	512	532	576	607	667	746
	264	507	523	544	590	621	683	764
	276	530	547	569	617	649	714	798
	288	553	571	593	643	677	745	833
420	330	634	654	680	737	776	854	954
	336	646	666	692	751	790	869	972
	342	657	678	705	764	804	885	989
	360	692	714	742	804	846	931	1046

Аналіз проводився в діапазоні струмів від 500 до 40000 А. Вольт амперну характеристику розглядати як апроксимуючу функцію представлену нижче:

$$U(I) = a + b * (\lg(I))^k. \quad (2)$$

Параметри  $a$ ,  $b$  і  $k$  для кожного ОПН відрізняються та будуть визначенні статистично. Для цього було використано «метод середніх», за допомогою якого можливо створити систему нелінійних рівнянь та розрахувати чисельними методами [7].

Отримана система рівнянь наведена нижче :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{m_1} (a + b * (\lg(I_i))^k - U_i) = 0 \\ \sum_{i=m_1+1}^{m_2} (a + b * (\lg(I_i))^k - U_i) = 0 \\ \sum_{i=m_2+1}^n (a + b * (\lg(I_i))^k - U_i) = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Зробивши всі перетворення попередньої системи рівнянь отримуємо нову систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} a * m_1 + b * \sum_{i=1}^{m_1} (\lg(I_i))^k = \sum_{i=1}^{m_1} U_i \\ a * (m_2 - m_1) + b * \sum_{i=m_1+1}^{m_2} \lg(I_i))^k = \sum_{i=m_1+1}^{m_2} U_i \\ a * (m_2 - m_1) + b * \sum_{i=m_2+1}^n (\lg(I_i))^k = \sum_{i=m_2+1}^{m_2} U_i \end{array} \right. \quad (4)$$

Параметри  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $n$  для таблиці 3 дорівнюють 3, 5, 7 відповідно.

Наступним кроком було розраховано дану систему рівнянь для кожного типу ОПН. Алгоритм розрахунку у даній роботі не наведено оскільки він показаний в літературі [7]. Отримані значення параметрів  $a$ ,  $b$ ,  $k$  зведено до таблиці 4.

Таблиця 4. Результати розрахунку системи рівнянь для кожного типу ОПН

Клас мережі, кВ	Клас напруги ОПН, кВ	Параметр а	Параметр b	Параметр k
24	24	44,429	0,015	4,85
36	36	66,873	0,018	4,99
52	51	94,689	0,0283	4,92
72	66	120,96	0,065	4,56
100	96	177,989	0,062	4,833
123	120	223,04	0,066	4,922
145	138	254,464	0,108	4,707
170	150	277,253	0,10098	4,807
245	210	389,165	0,13	4,85
	216	398,454	0,153	4,77
	219	404,954	0,139	4,84
	222	410,708	0,1463	4,8189
	228	421,052	0,1566	4,7957
300	216	398,454	0,153	4,77
	240	444,296	0,15	4,85
	258	477,434	0,169	4,82
	264	487,007	0,186	4,77
	276	509,312	0,195	4,77
362	258	477,434	0,169	4,82
	264	487,007	0,186	4,77
	276	509,312	0,195	4,77
	288	532,085	0,189	4,8233
420	330	609,63	0,22	4,809
	336	620,46	0,23	4,793
	342	632,2338	0,22	4,82
	360	667,6815	0,2017	4,92



## 2.2. Модель обмежувача перенапруг нелінійного, що запропонована на кафедрі «Техніки та електрофізики високих напруг» КПІ ім. Ігоря Сікорського та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version.

Динамічні (частотно-залежні) моделі нелінійних обмежувачів перенапруг, що використані в дослідженні були створені в середовищі Micro-Cap[8,9]. Для даної моделі взято ОПН класом напруги мережі від 245 до 420 кВ. Отже, було змодельовано 18 апаратів. Моделювання проводиться при струмі блискавки, що варіюється від 2 до 20 кА. Аналіз проводився за допомогою вбудованої функції кількісного аналізу (Stepping)[10]. Для відтворення схем заміщення ОПН, а саме нелінійних параметрів в Micro-Cap використовуємо функціональну модель джерела напруги, що керується струмом [11].

Розрахувавши систему рівнянь, покажемо для прикладу як виглядає вольт-амперна характеристика для ОПН типу PERLIM Q 245-210:

$$U(I) = 389,165 * 0.13 * (\log_{10}(I))^{4.856} ,$$

де напруга  $U$  береться в кіловольтах, а струм  $I$  в амперах.

Для інших моделей ОПН такий вигляд не наведено оскільки мають аналогічний вигляд. Схемо-технічна модель ОПН типу PERLIM Q 245-210 запропонована на кафедрі ТЕВН представлена на рис. 2.1.1 [7]. Результати моделювання показані на рис. 2.1.3.

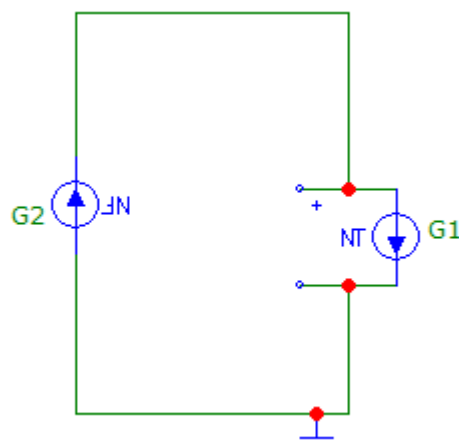


Рис. 2.1.1. Модель ОПН PERLIM Q 245-210 запропонована на кафедрі ТЕВН в середовищі Micro-Cap

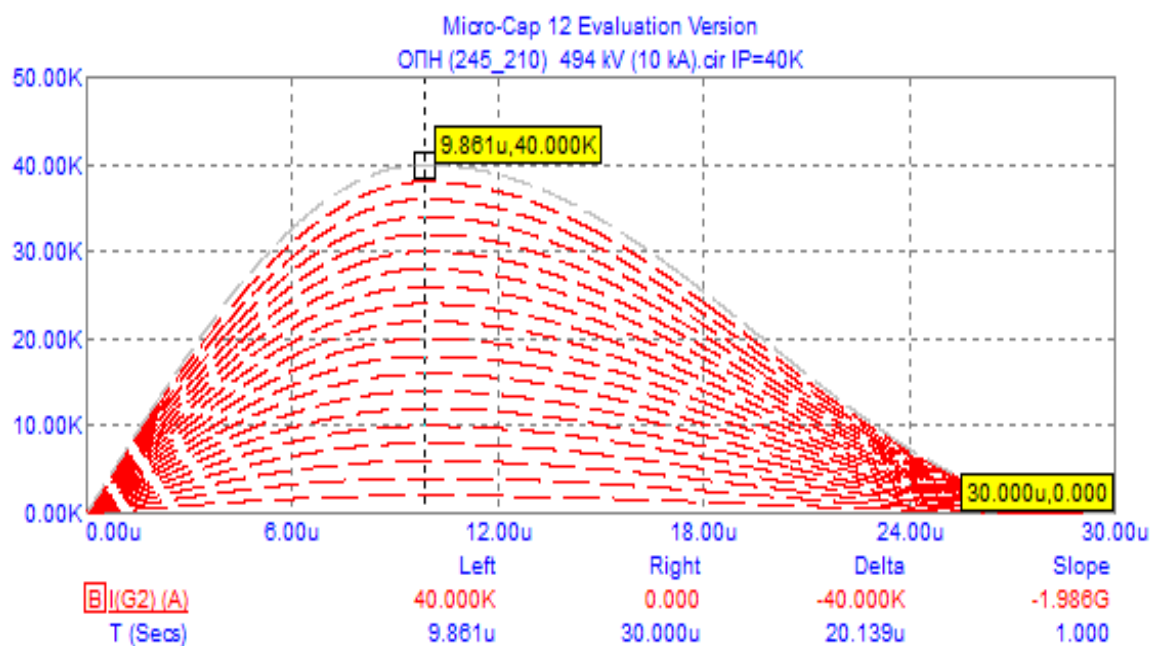


Рис.2.1.2. Змодельовані струми, що протікають в усіх моделях ОПН

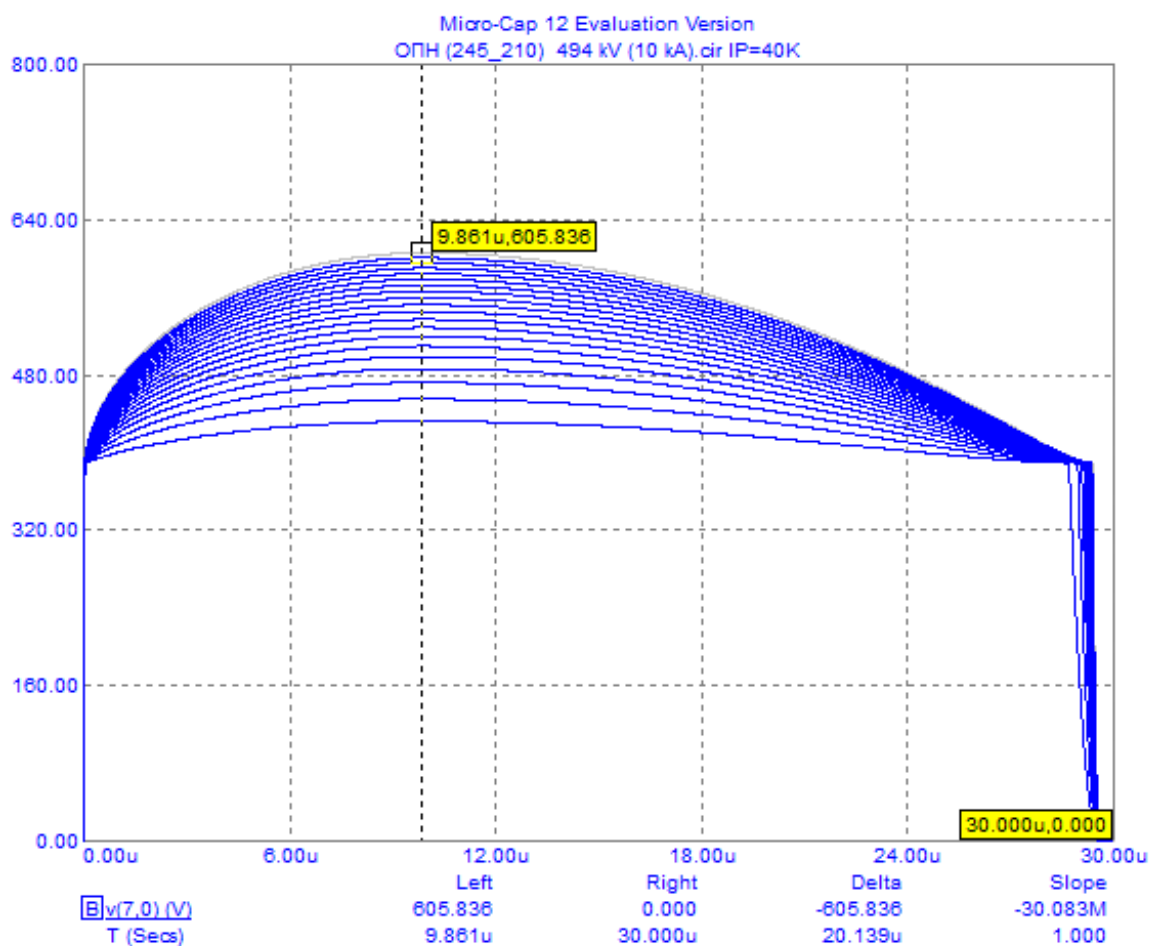


Рис.2.1.3 Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-210 при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА

Моделі даного типу виглядають однаково, тільки змінюються внутрішні параметри, тому їх не наведено. Результати моделювання інших випробних ОПН, а саме моделей PERLIM Q : 245-216, 245-219, 245-222, 245-228, 300-216, 300-240, 300-258, 300-264, 300-276, 362-258, 362-264, 362-276, 362-288, 420-330, 420-336, 420-342, 420-360 наведені нижче у вигляді графіків сімейств кривих залишкової напруги при струмах від 2 до 20 кА.

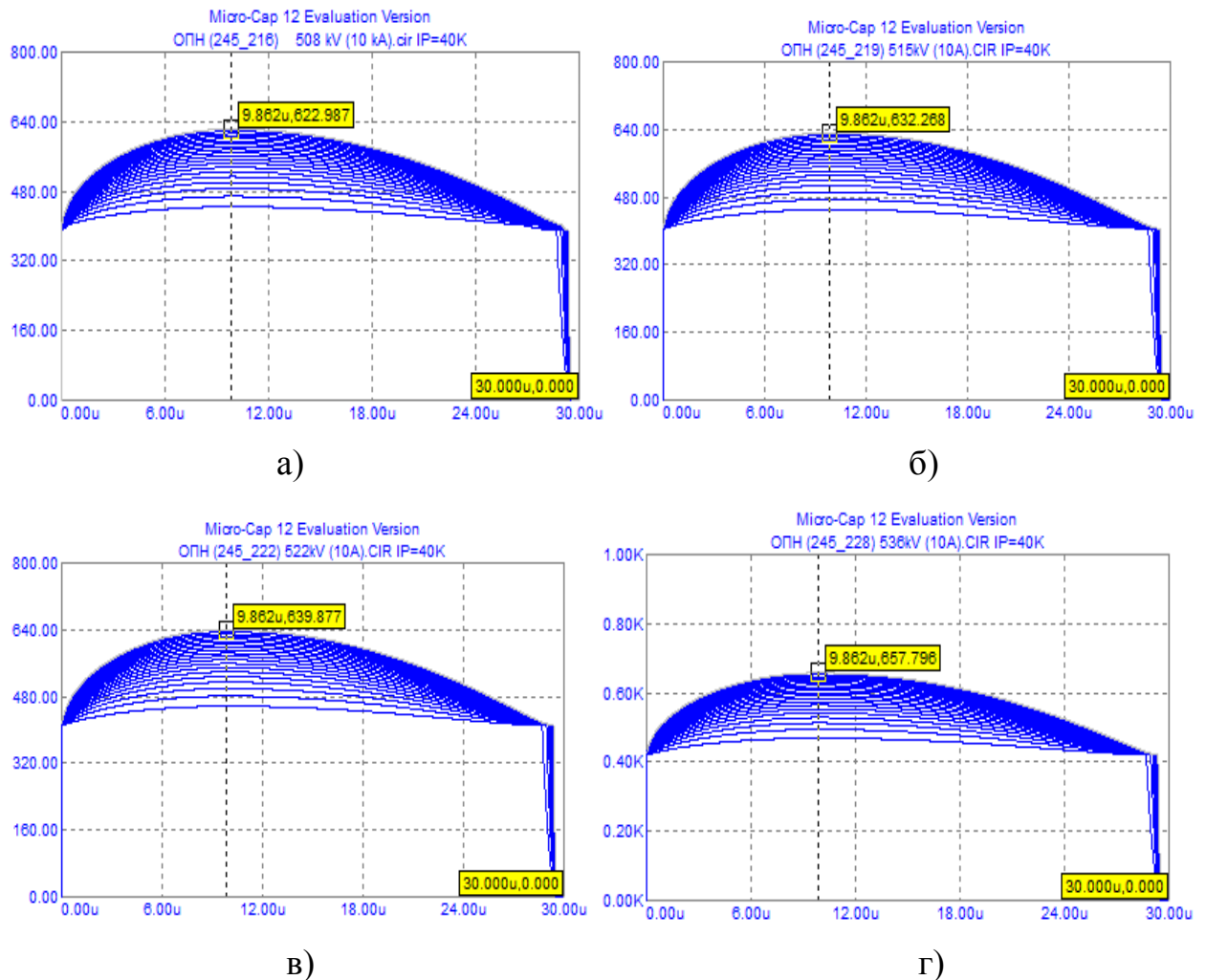
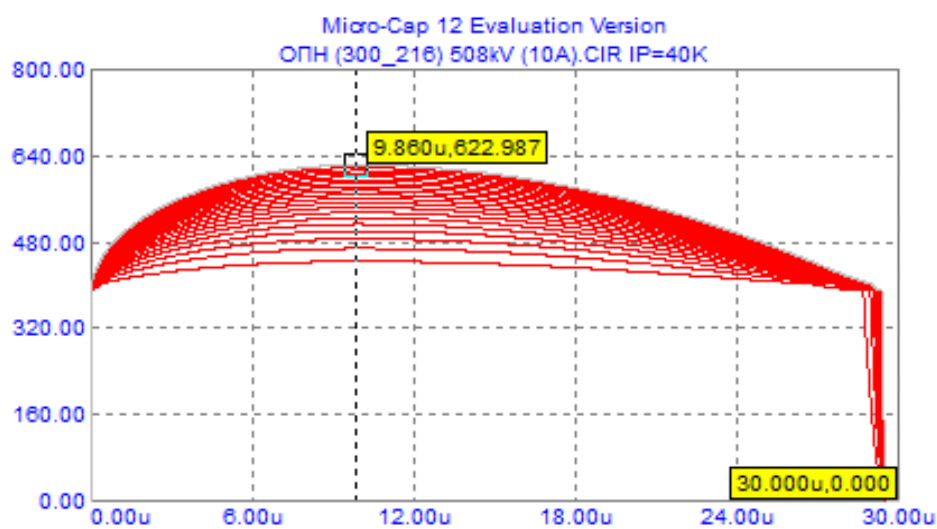
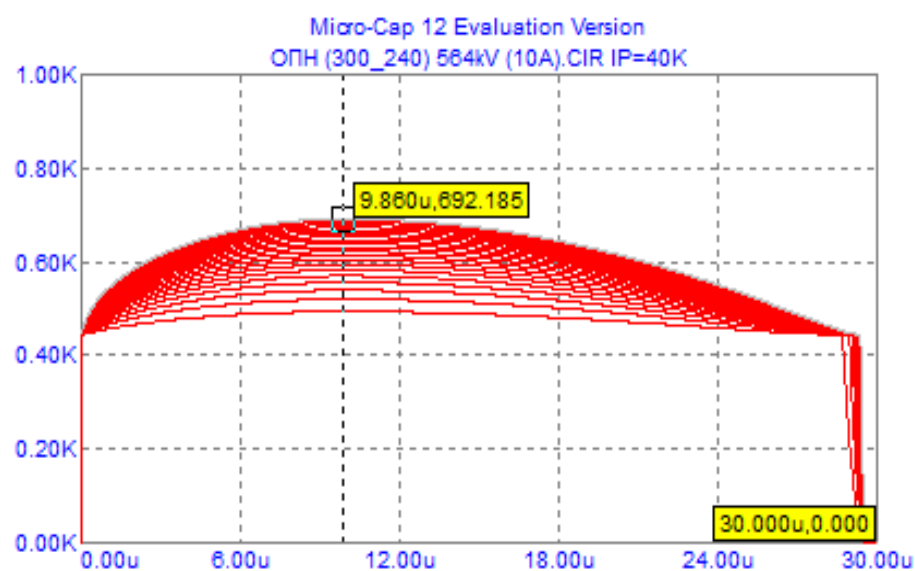


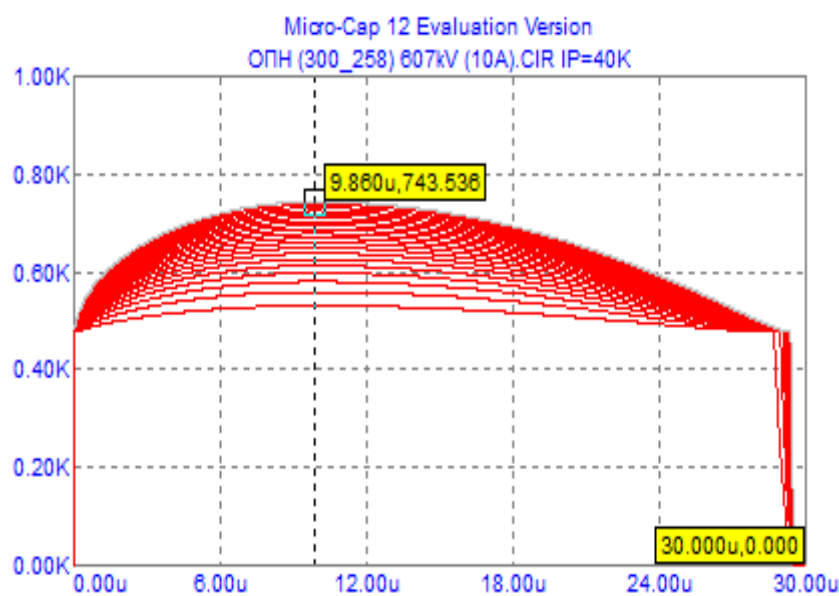
Рис. 2.1.4. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА : а) – PERLIM Q245-216; б) -PERLIM Q 245-219; в) - PERLIM Q 245-222; г) - PERLIM Q 245-228



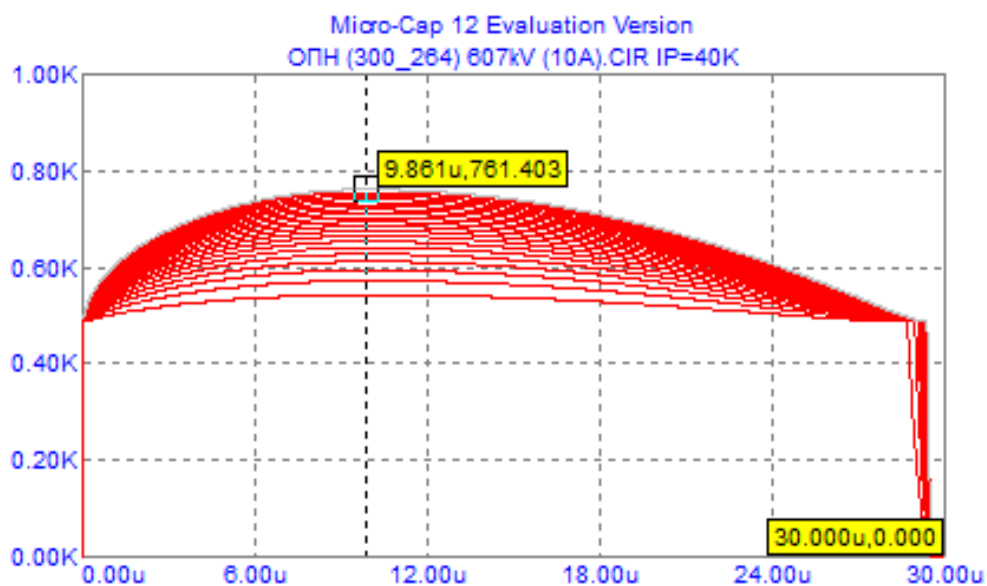
a)



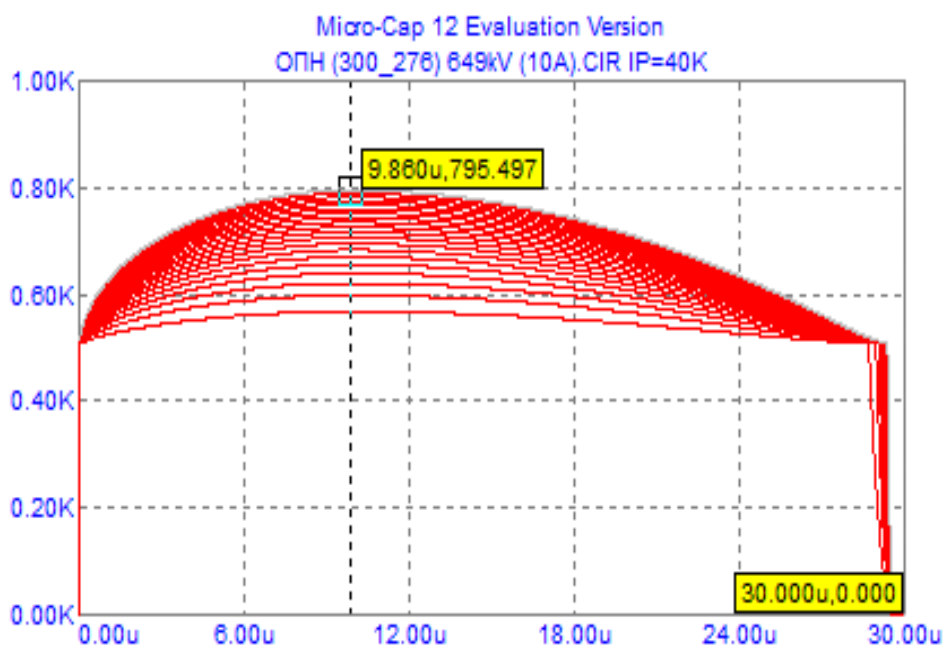
б)



B)

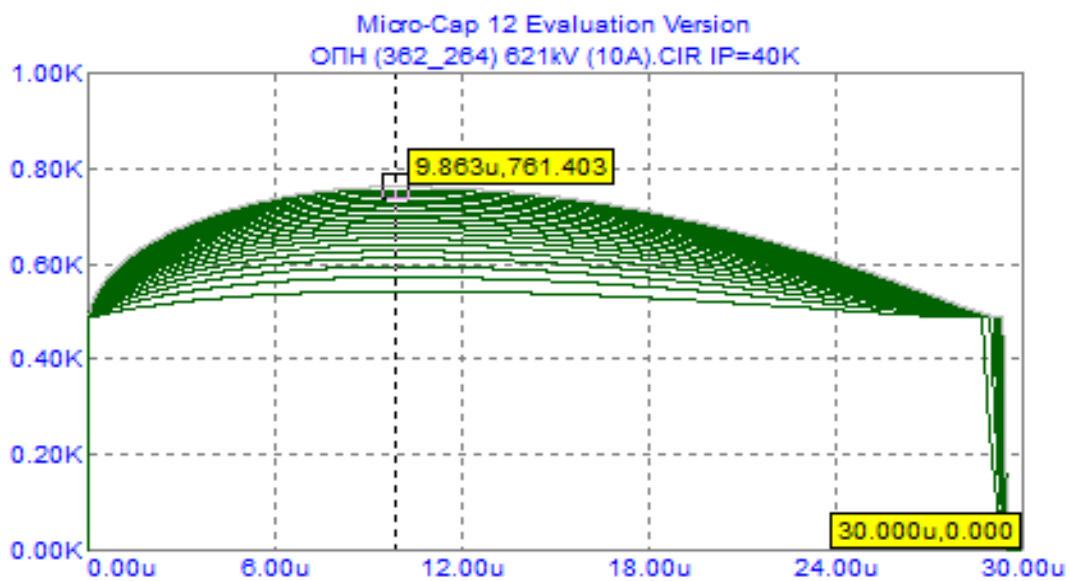


г)

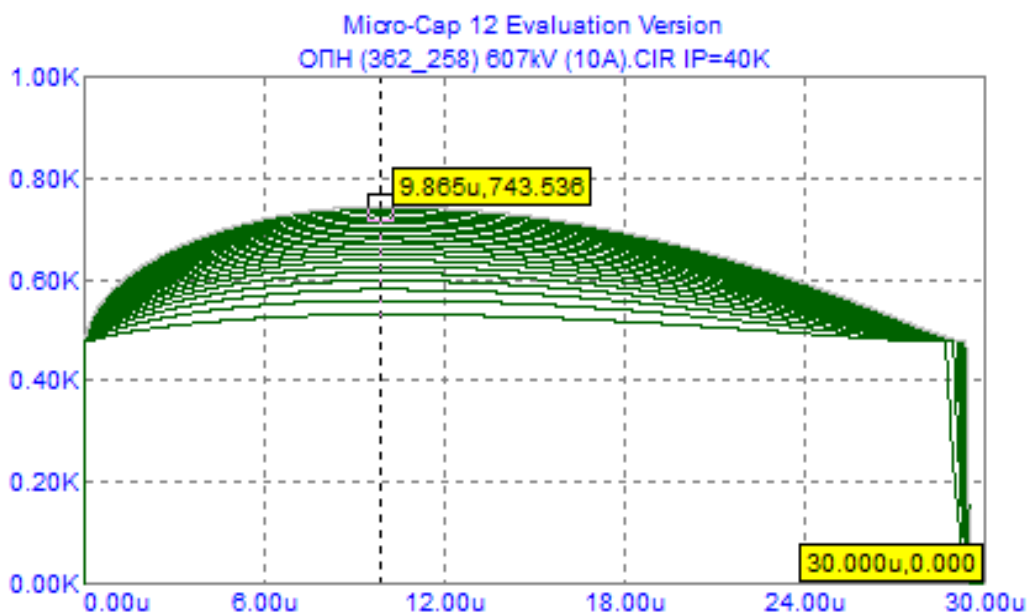


д)

Рис. 2.1.5. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА : а) – PERLIM Q 300-216; б) - PERLIM Q 300-240; в) - PERLIM Q 300-258; г) - PERLIM Q 300-264; д) - PERLIM Q 300-276

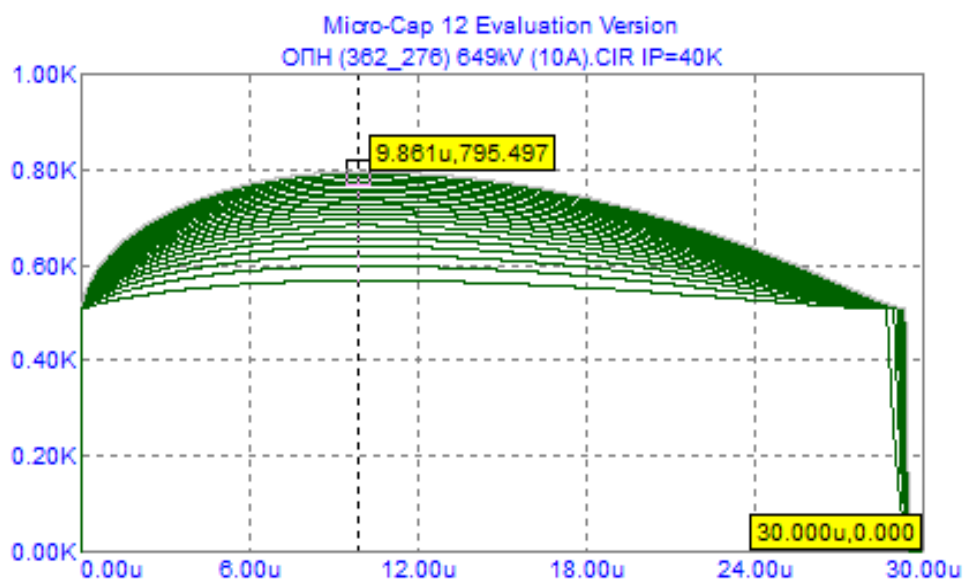


а)

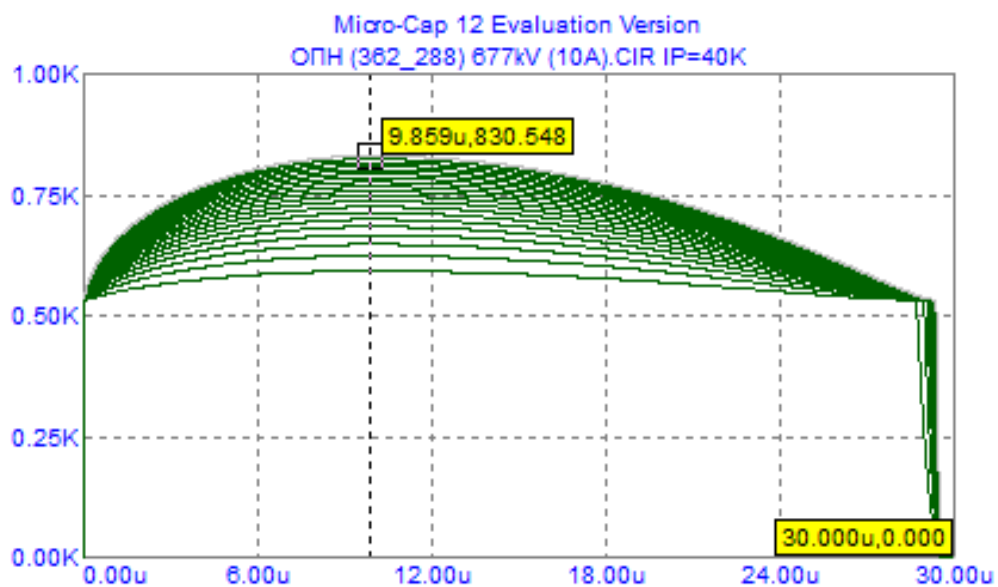


б)

Рис. 2.1.6. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА : а) PERLIM Q - 362-258;  
б) - PERLIM Q 362-264



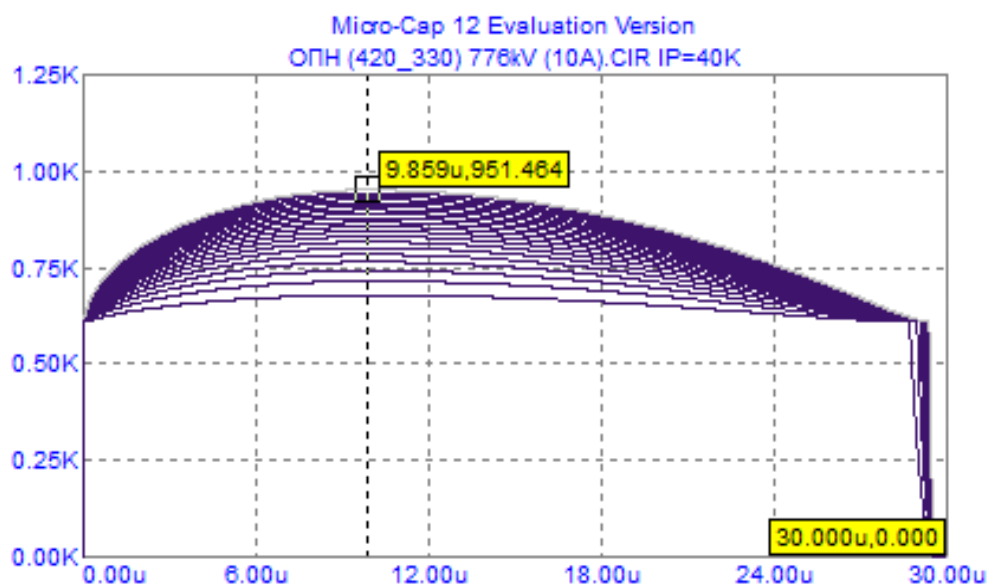
в)



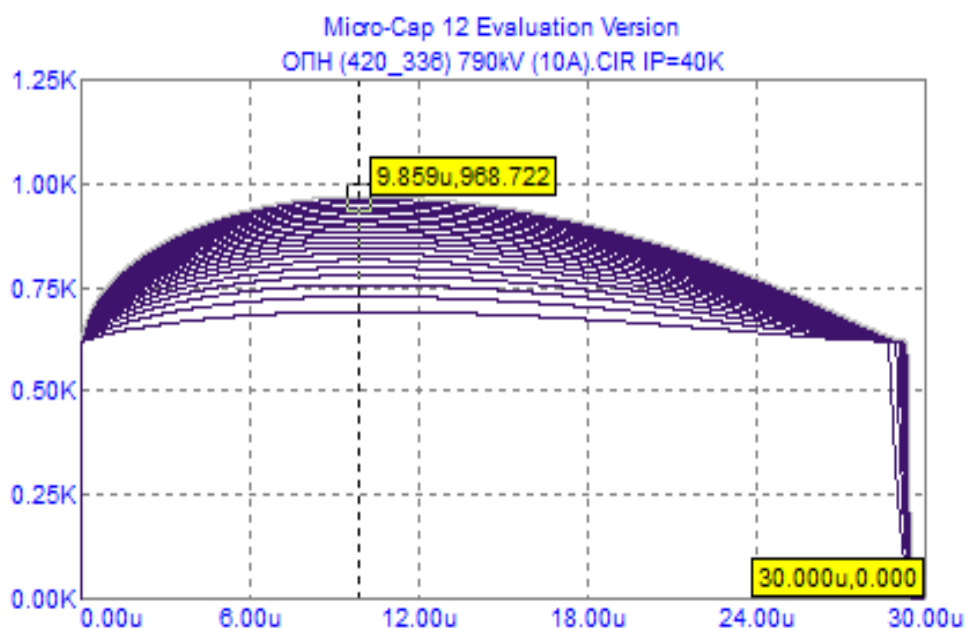
г)

Рис. 2.1.6. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА(продовження): в)

PERLIM Q - 362-276; г) PERLIM Q - 362-288



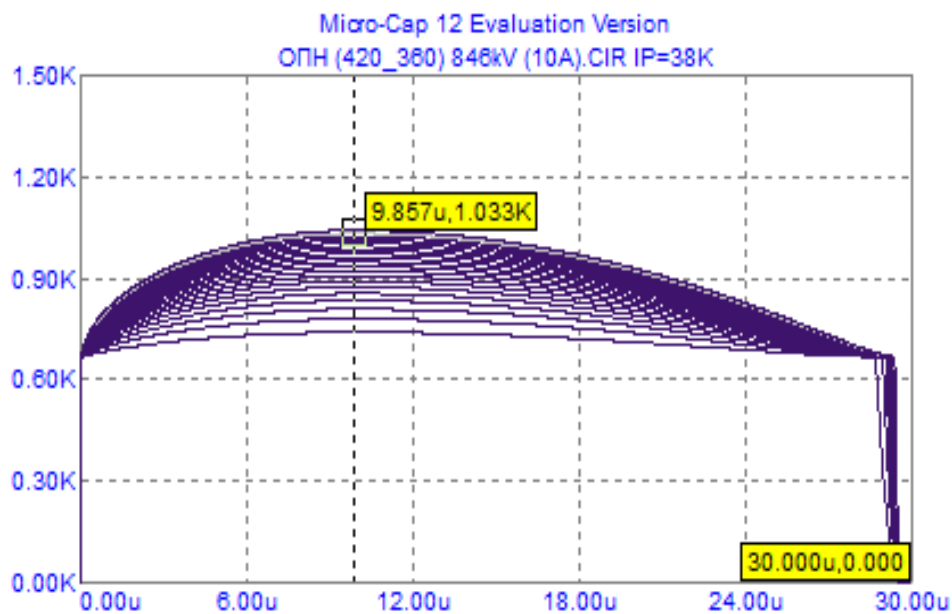
а)



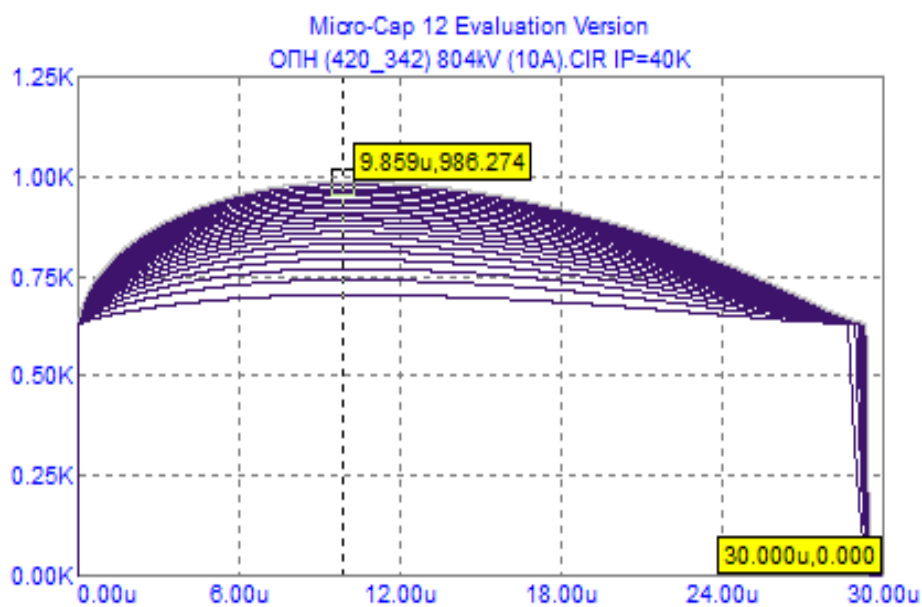
б)

Рис. 2.1.7. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА : а) PERLIM Q 420-330; б) PERLIM Q 420-336





В)



Г)

Рис. 2.1.7. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження) : PERLIM Q 420-342; PERLIM Q 420-360

### **2.3 . Висновки до розділу 2**

В даному розділі було розглянуто моделювання спрощеної моделі обмежувача перенапруги нелінійного за допомогою аналітичного вигляду вольт-амперної характеристики. За допомогою аналітичного виразу можливо розраховувати захисні рівні ОПН при впливі грозових та комутаційних перенапруг. На випробні обмежувачі перенапруги було подано струм формою 8/20 мкс від 2 до 20 кА імітуючи струм блискавки. Значення залишкової напруги отримані в ході моделювання наведені у таблиці 7.

### 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО, ЩО ЗАПРОПОНОВАНА НА КАФЕДРІ ТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ НАПРУГ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

#### 3.1. Удосконалення моделі обмежувача перенапруг нелінійного, що запропонована на кафедрі техніки та електрофізики високих напруг КПІ ім. Ігоря Сікорського

Удосконалення моделі полягає в тому, що до існуючої моделі додаємо ємність  $C_0$ , що означає власну ємність обмежувача перенапруг. Значення ємності розраховуємо за формулою :

$$C_0 = 100 * \frac{n}{d}, \text{ пФ} \quad (5)$$

де  $n$  – кількість паралельних колон варисторів,  $d$  – робоча висота ОПН.

Розраховані ємності для ряду ОПН, що взяті з попереднього розділу роботи, зведемо до таблиці 5. Нижче наведено удосконалену схему для ОПН типу PERLIM Q 245-210 на рис. 3.1.1.

Таблиця 5. Розраховані значення ємностей для ряду ОПН

Класс напруг	24	36	52	72	100	123	145	170	245	300	362	420
n	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d, m	0,48	0,48	0,73	1,08	1,08	1,39	1,39	1,51	2,61	2,87	3,53	3,21
$C_0$ , пФ	207,9	207,9	135,87	92,593	92,593	71,582	71,582	66,401	51,308	34,819	28,305	31,095

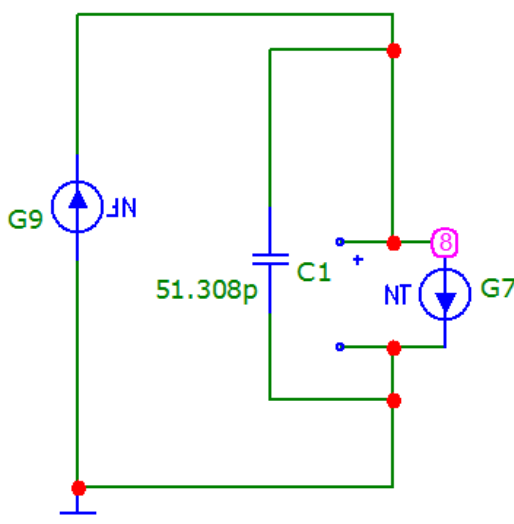


Рис. 3.1.1. Удосконалена модель обмежувача перенапруг типу PERLIM Q 245-210.

Результати моделювання показані на Рис.3.1.2.

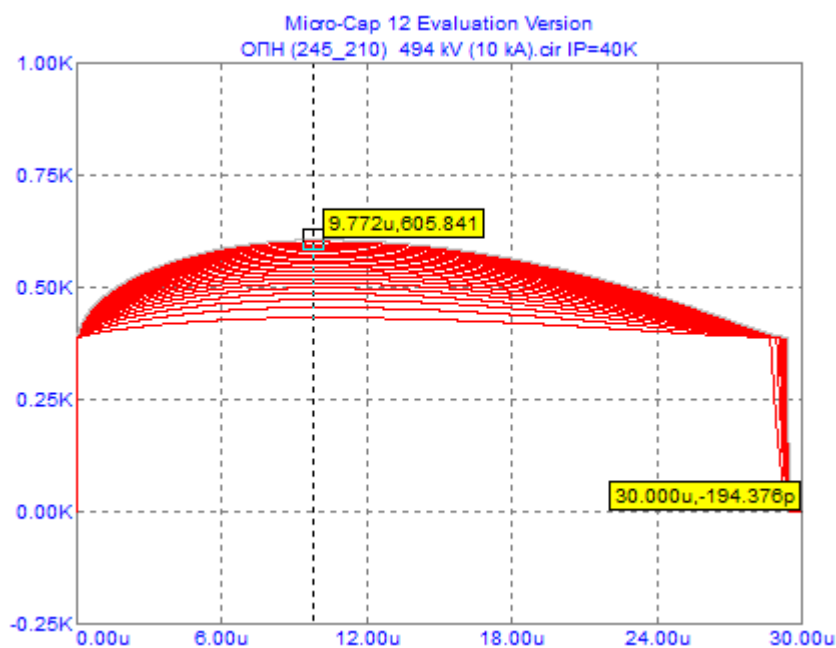
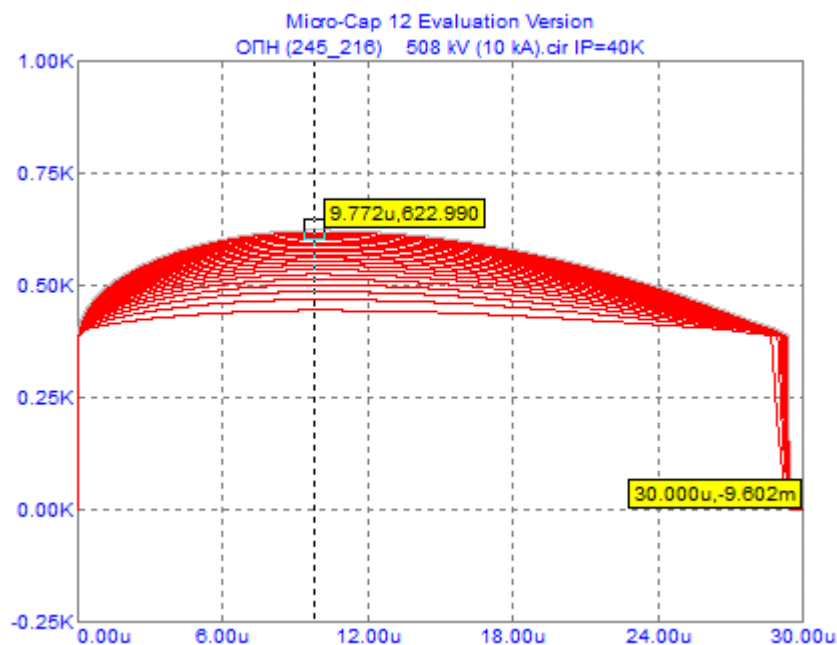


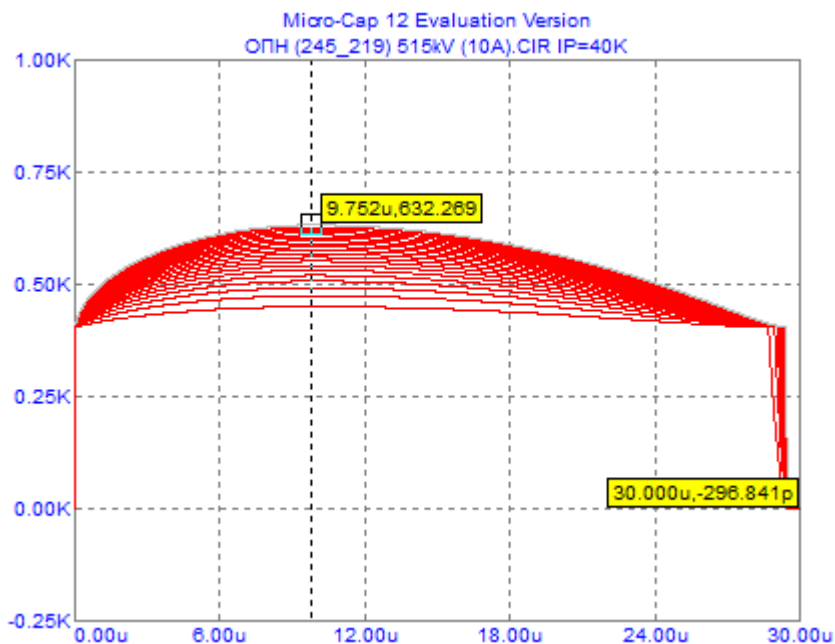
Рис. 3.1.2. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН PERLIM Q 245-210 при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА.

Моделі даного типу виглядають однаково, тільки змінюються внутрішні параметри та ємність (див. табл. 5 , тому їх не наведено). Результати моделювання інших випробних ОПН, а саме моделей PERLIM Q : 245-216,

245-219, 245-222, 245-228, 300-216, 300-240, 300-258, 300-264, 300-276, 362-258, 362-264, 362-276, 362-288, 420-330, 420-336, 420-342, 420-360 наведені нижче у вигляді графіків сімейств кривих залишкової напруги при струмах від 2 до 20 кА на рис. 3.1.3. - 3.1.6.) .



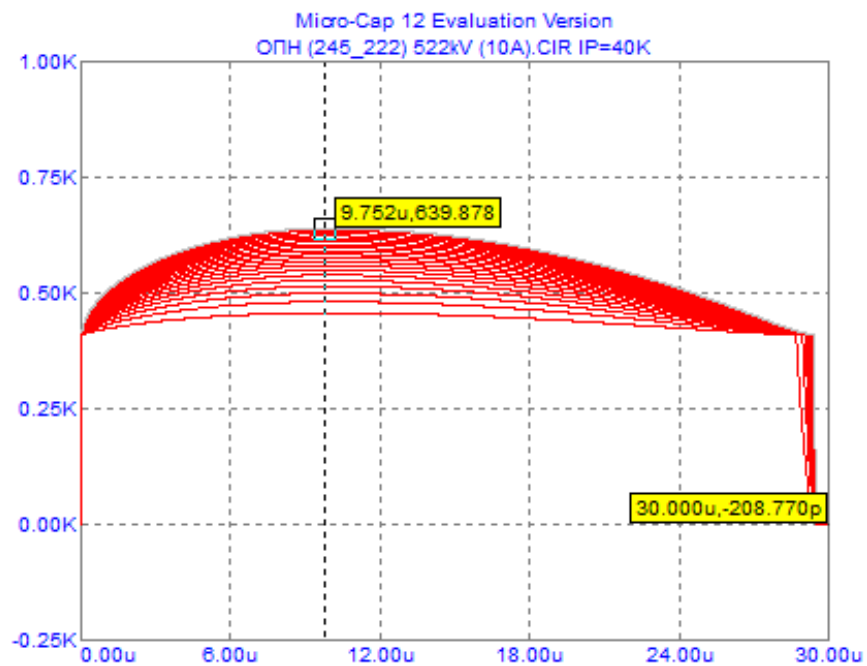
а)



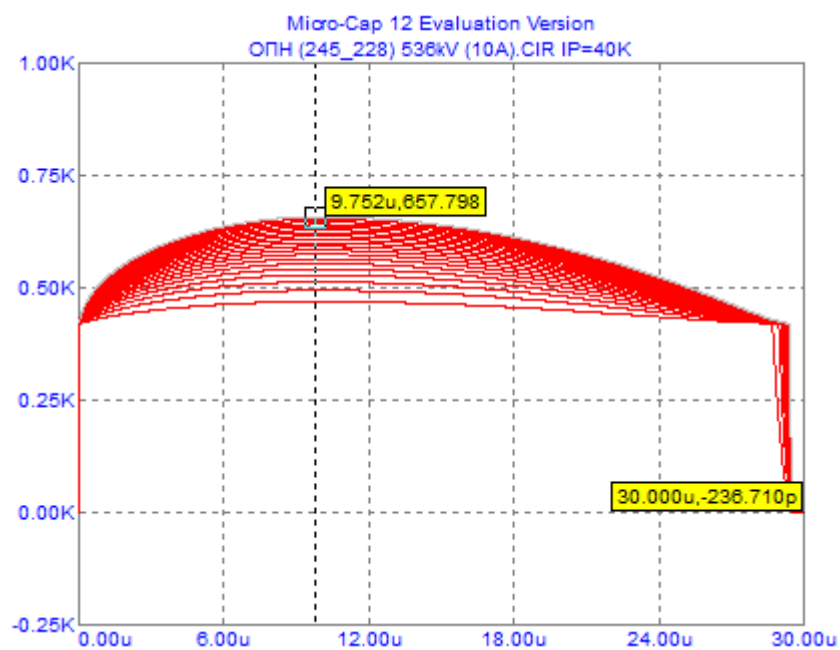
б)

Рис. 3.1.3. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА :

а) – PERLIM Q245-216; б) -PERLIM Q 245-219

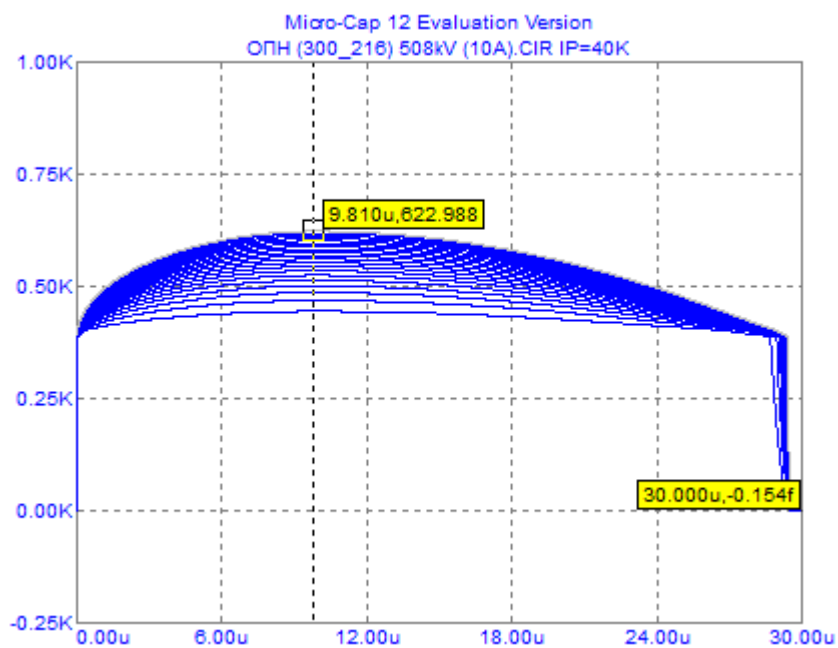


в)

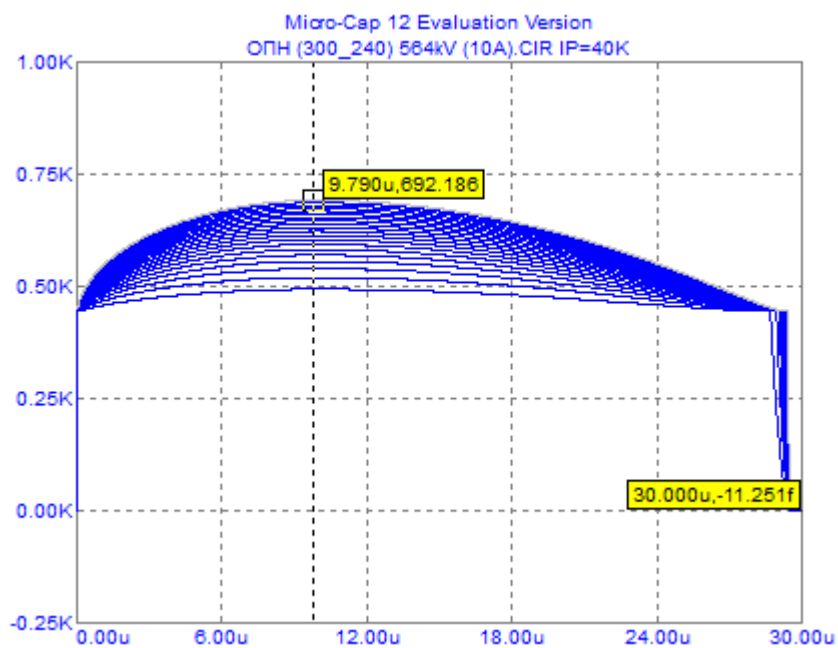


г)

Рис. 3.1.3. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження): в) - PERLIM Q 245-222; г) - PERLIM Q 245-228

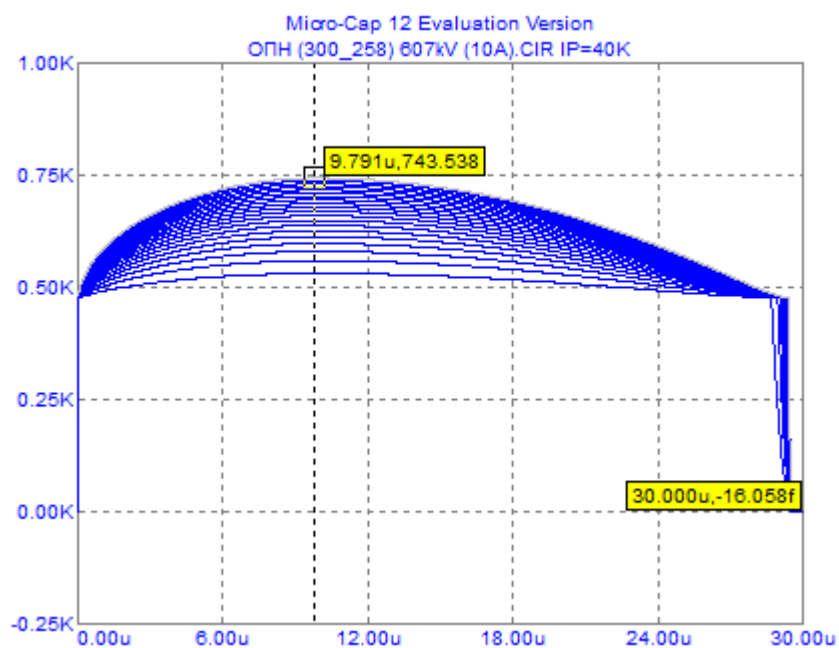


а)

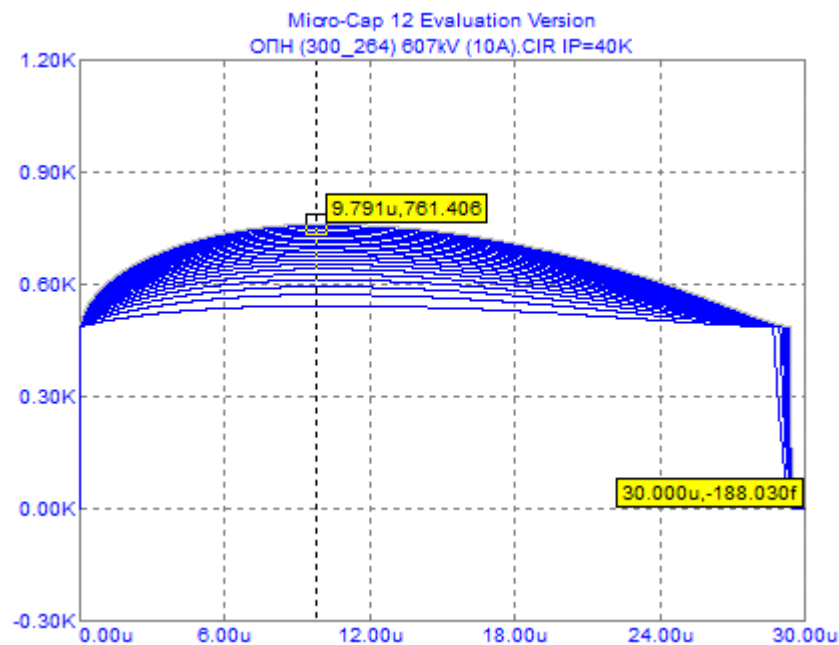


б)

Рис. 3.1.4. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА : а) – PERLIM Q 300-216; б) - PERLIM Q 300-240



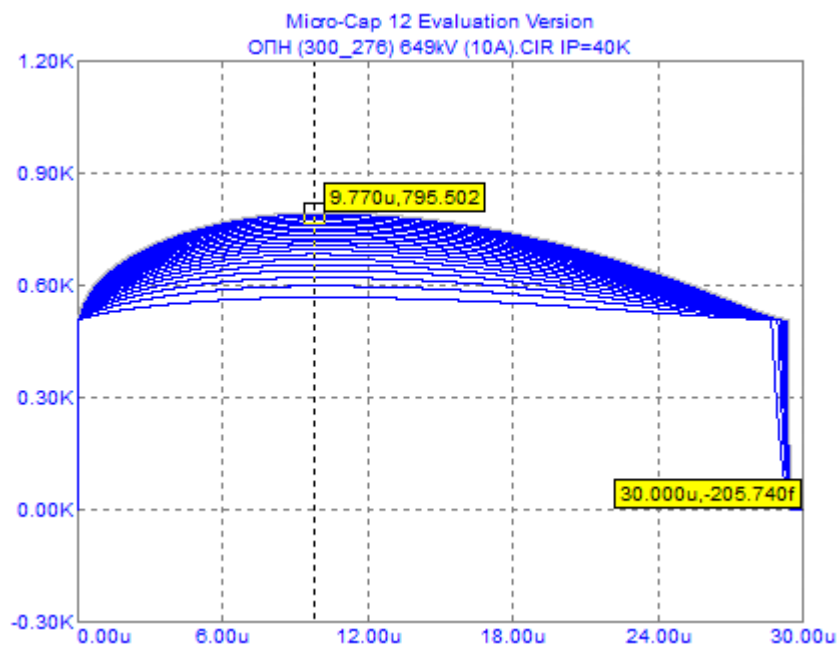
в)



г)

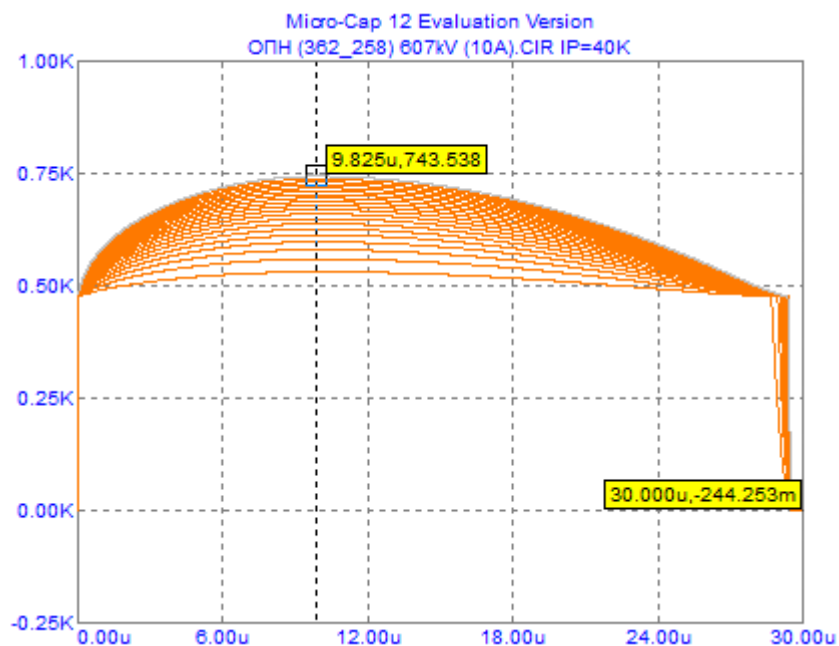
Рис. 3.1.4. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження) : в) - PERLIM Q 300-258; г) - PERLIM Q 300-264





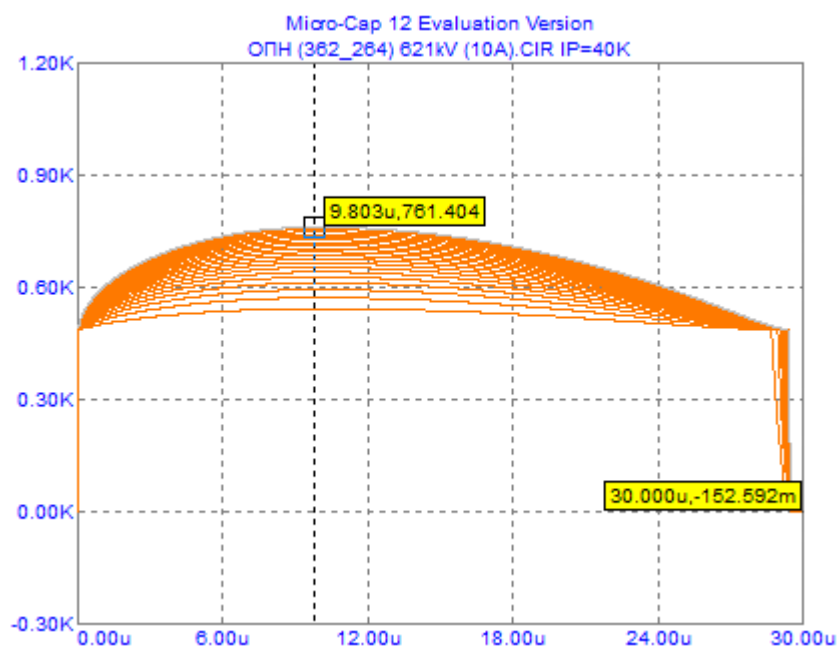
д)

Рис. 3.1.4 Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження): д) - PERLIM Q 300-276

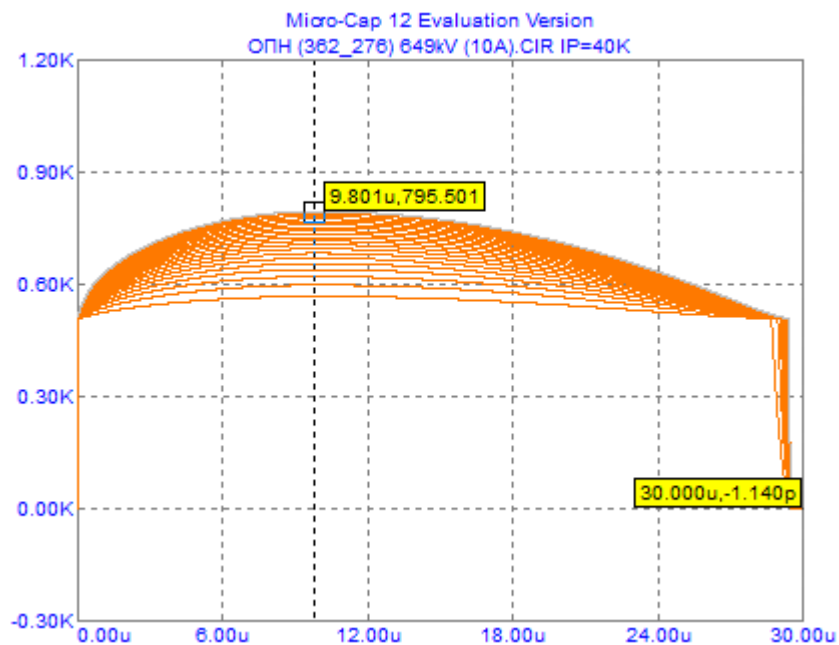


а)

Рис. 3.1.5. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА :  
а) PERLIM Q - 362-258;

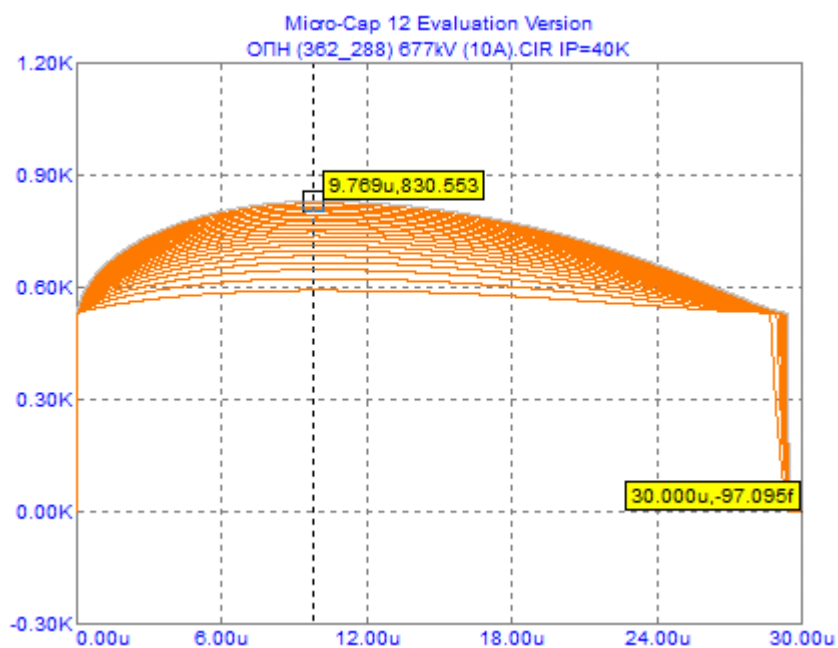


б)



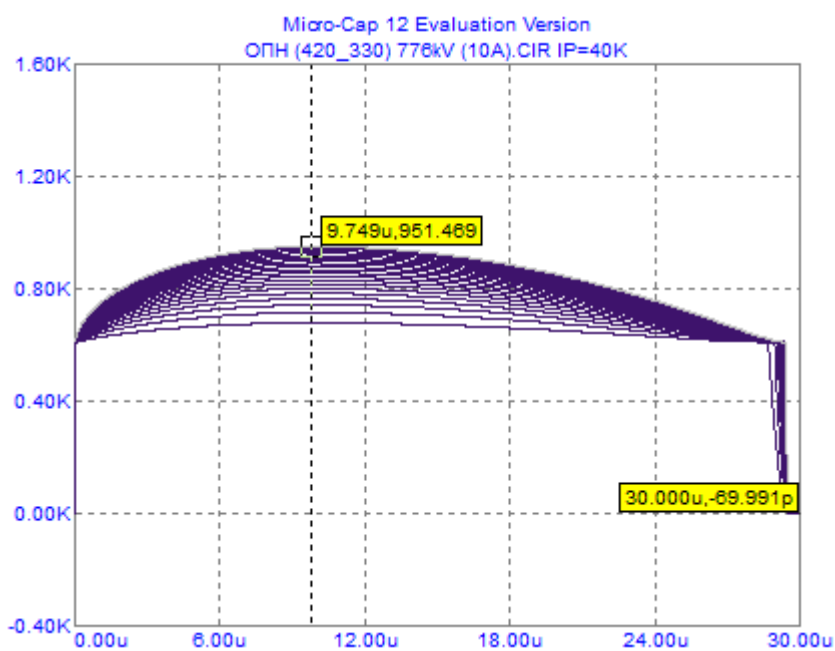
в)

Рис. 3.1.5. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження): б) - PERLIM Q 362-264; в) - PERLIM Q 362-264



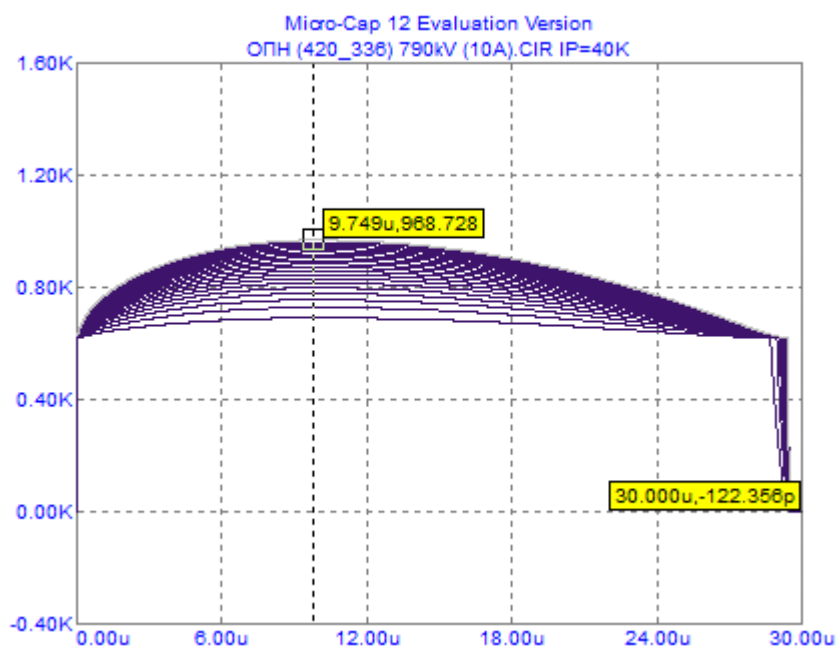
г)

Рис.3.1.5. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження): г) - PERLIM Q 362-288

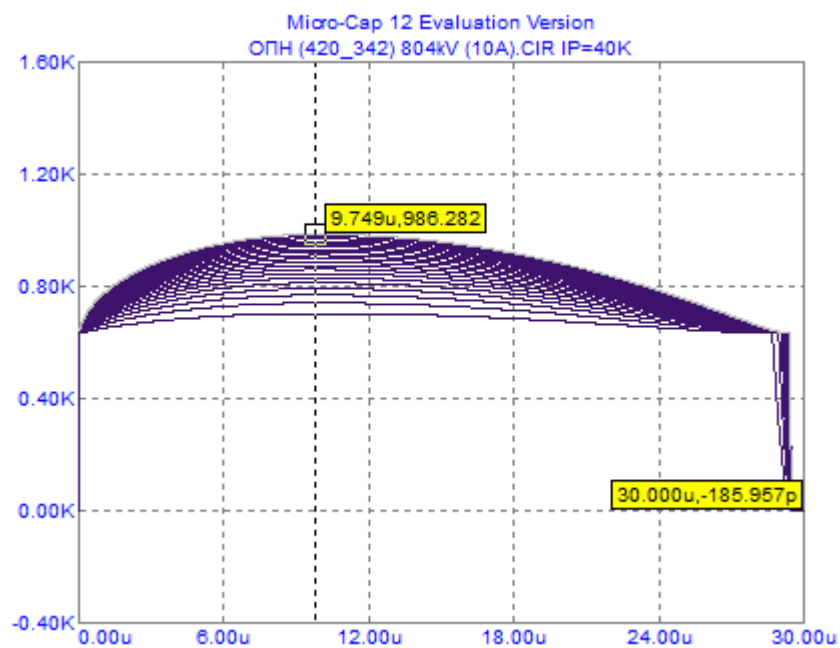


а)

Рис. 3.1.6. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА :  
а) PERLIM Q 420-330

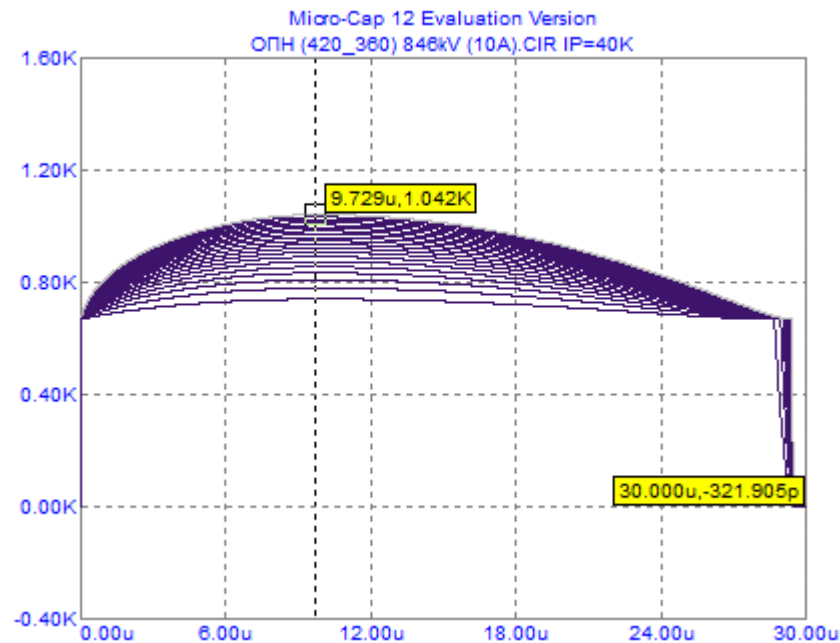


б)



в)

Рис. 3.1.6. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження) : б) - PERLIM Q 420-336; в) - PERLIM Q 420-342



г)

Рис. 3.1.6. Сукупність кривих, що показують залишкову напругу в удосконаленому ОПН при проходженні через нього струму від 2 до 20 кА (продовження) : г) - PERLIM Q 420-360

### 3.2. Порівняння результатів моделі ОПН до і після удосконалення та з іншими існуючими моделями ОПН

Для порівняння результатів візьмемо повну модель IEEE 1992 року та спрощену модель 2004 року та змодельюємо випробні ОПН за допомогою цих моделей. Для початку розрахуємо параметри моделей 1992 та 2004 року за [12,13] та зведемо отримані результати у таблицю 6.

Таблиця 6. Розраховані параметри моделей 1992 та 2004 року.

Клас напруги, кВ	Клас напруги ОПН, кВ	Параметри: для моделі 1992					Для моделі 2004	
		L <sub>0</sub> , мкГн	R <sub>0</sub> , Ом	L <sub>1</sub> , мкГн	R <sub>1</sub> , Ом	C <sub>0</sub> , пФ	L <sub>1</sub> , мкГн	L <sub>2</sub> , мкГн
245	210	0,523	261,7	39,25	170,1	51,30	2,1	6,3
	216	0,523	261,7	39,25	170,1	51,30	2,16	6,48
	219	0,523	261,7	39,25	170,1	51,30	2,19	6,57

Таблиця 6 (продовження). Розраховані параметри моделей 1992 та 2004 року.

245	222	0,523	261,7	39,25	170,1	51,30	2,22	6,66
	228	0,523	261,7	39,25	170,1	51,30	2,28	6,84
300	216	0,574	287,2	43,08	186,6	34,71	2,16	6,48
	240	0,574	287,2	43,08	186,6	34,71	2,4	7,2
	258	0,574	287,2	43,08	186,6	34,71	2,58	7,74
	264	0,574	287,2	43,08	186,6	34,71	2,64	7,92
	276	0,574	287,2	43,08	186,6	34,71	2,76	8,28
362	258	0,707	353,3	52,99	229,6	28,30	2,58	7,74
	264	0,707	353,3	52,99	229,6	28,30	2,64	7,92
	276	0,707	353,3	52,99	229,6	28,30	2,76	8,28
	288	0,707	353,3	52,99	229,6	28,30	2,88	8,64
420	330	0,643	321,6	48,24	209,04	31,09	3,3	9,9
	336	0,643	321,6	48,24	209,04	31,09	3,36	10,08
	342	0,643	321,6	48,24	209,04	31,09	3,42	10,26
	360	0,643	321,6	48,24	209,04	31,09	3,6	10,8

Повна та спрощена моделі ОПН PERLIM Q 245-210 представлені на рис. 3.2.1 – рис.3.2.2.

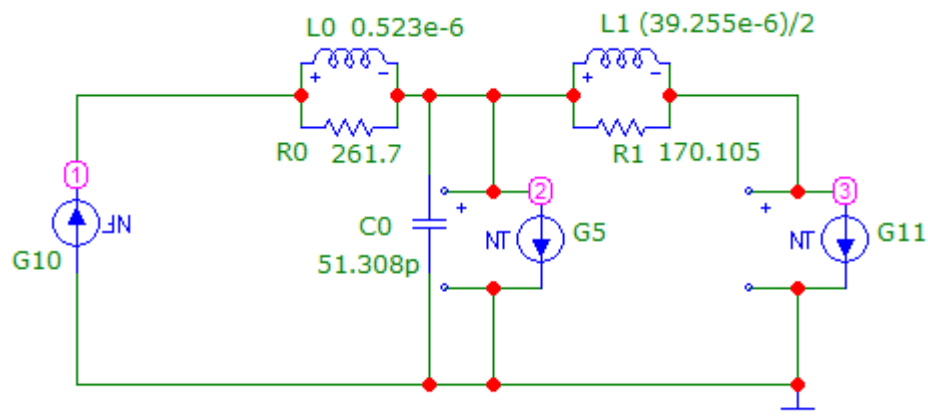


Рис. 3.2.1. Повна модель 1992 року для ОПН типу PERLIM Q 245-210

Модель ОПН IEEE використовується у якості базової моделі в такій програмі як EMTP-RV. Приклади моделювання в даній програмі наведено нижче:

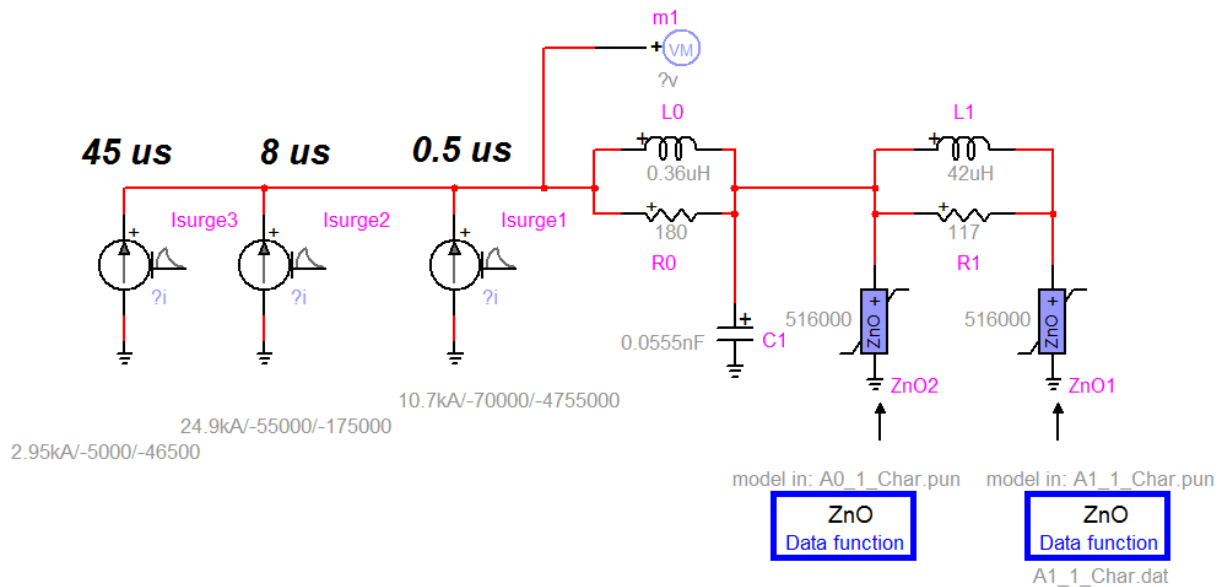


Рис. 3.2.2. Приклад 1: Моделювання метало-оксидного обмежувача перенапруг нелінійного для мережі 330 кВ

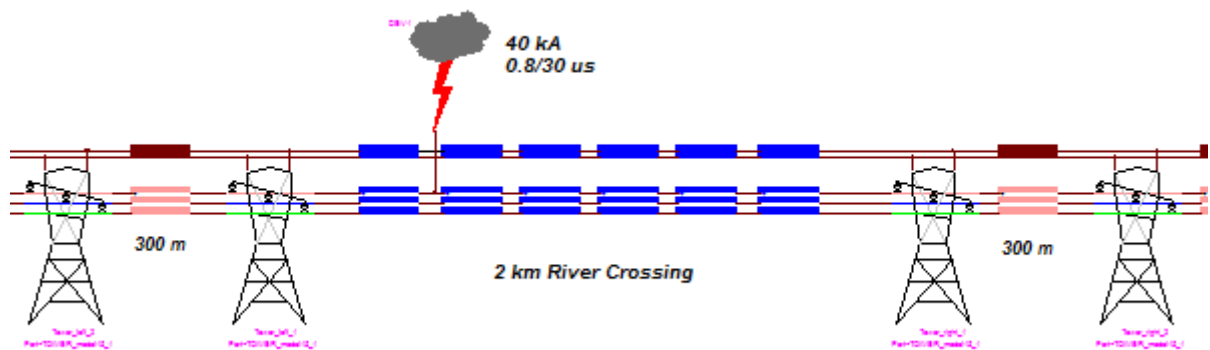


Рис. 3.2.3. Приклад 2: Моделювання лінійних ОПН на лінії електропередачі 765 кВ та удар блискавки у лінію, де провід провисає на 2 км над уявною рікою.

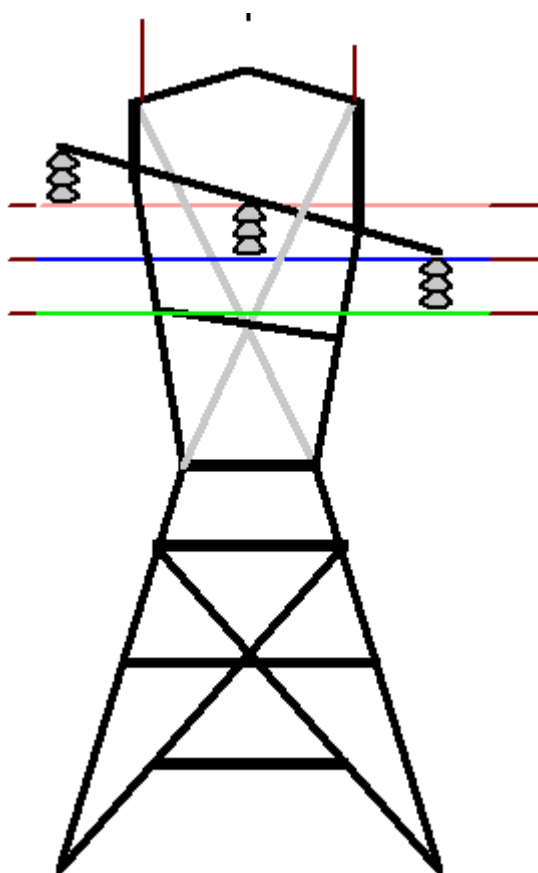


Рис. 3.2.4. Приклад 3: Модель траверси з лінійним ОПН призначеним на 588 кВ.

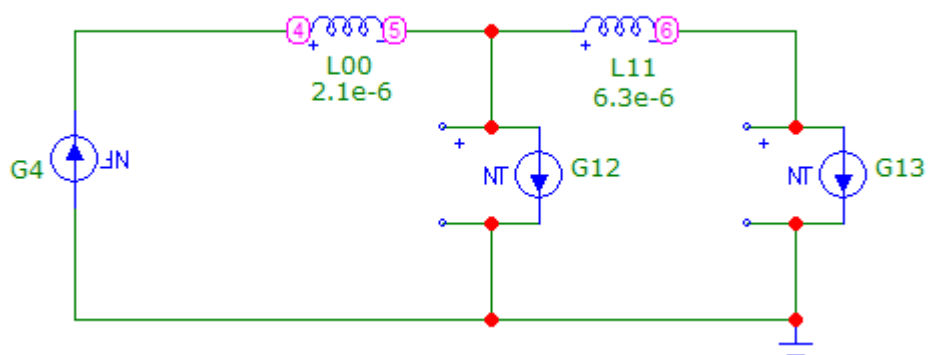
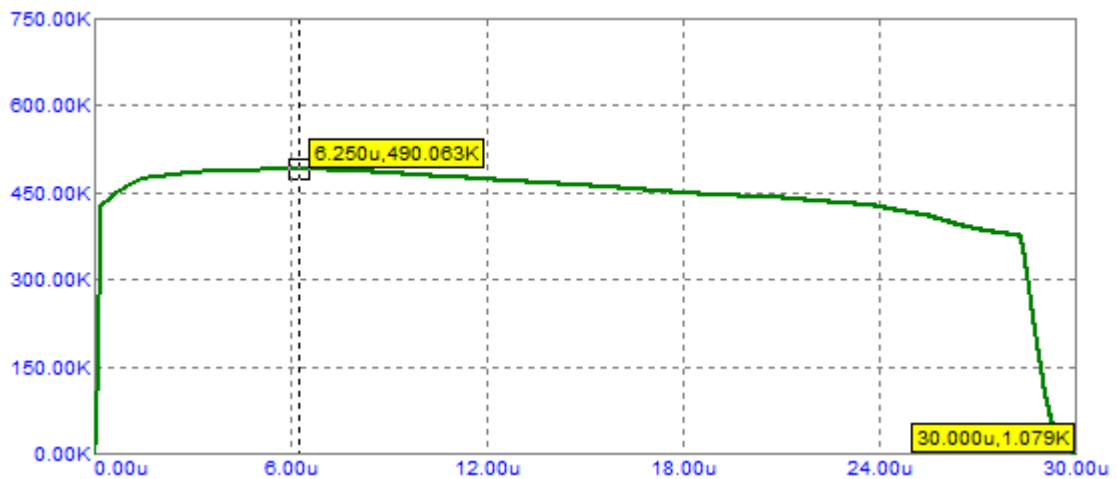
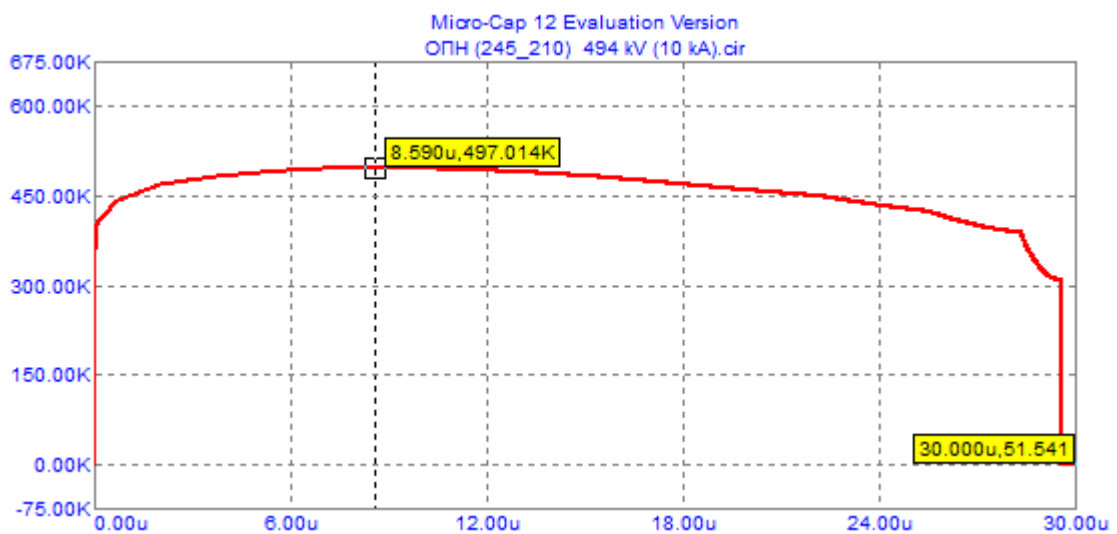


Рис. 3.2.5. Спрощена модель 2004 року для ОПН типу PERLIM Q 245-210





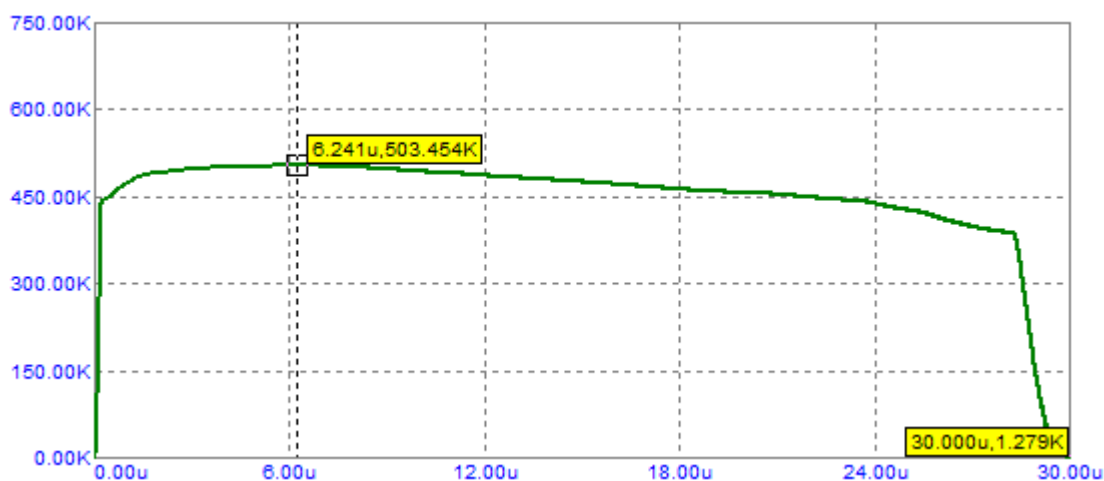
а)



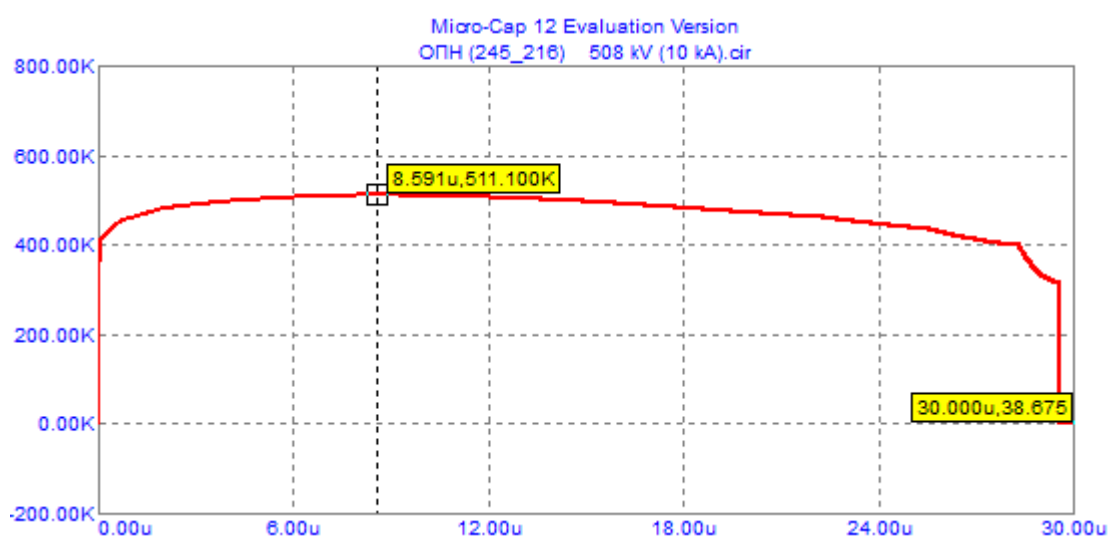
б)

Рис. 3.2.6. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-210 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Результати моделювання за допомогою повної та спрощеної моделей інших випробних ОПН , а саме моделей PERLIM Q : 245-216, 245-219, 245-222, 245-228, 300-216, 300-240, 300-258, 300-264, 300-276, 362-258, 362-264, 362-276, 362-288, 420-330, 420-336, 420-342, 420-360 наведені нижче у вигляді графіків сімейств кривих залишкової напруги при струмі 10 кА( рис. 3.2.7 – рис. 3.2.23.).



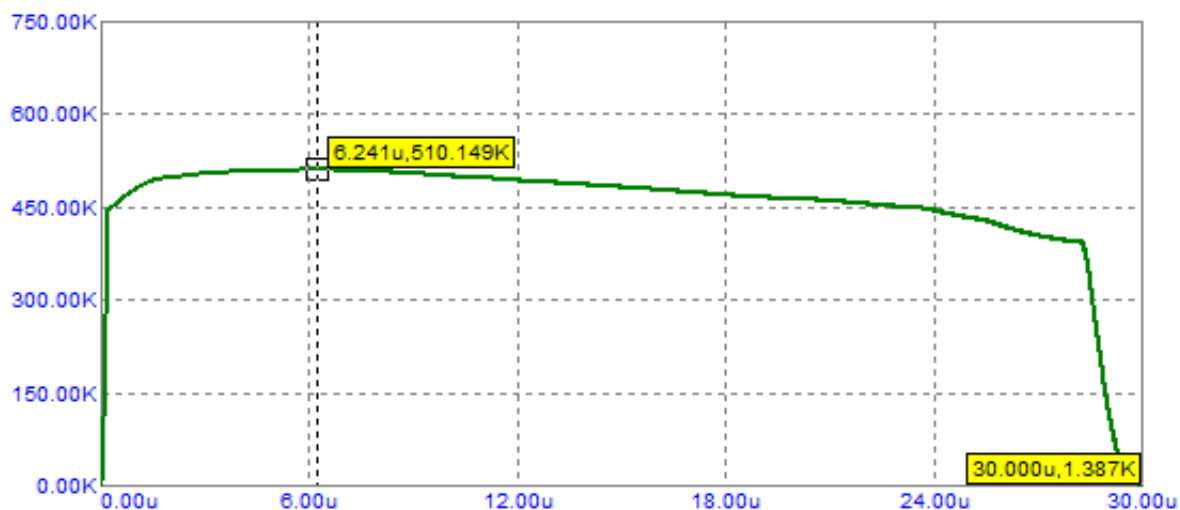
а)



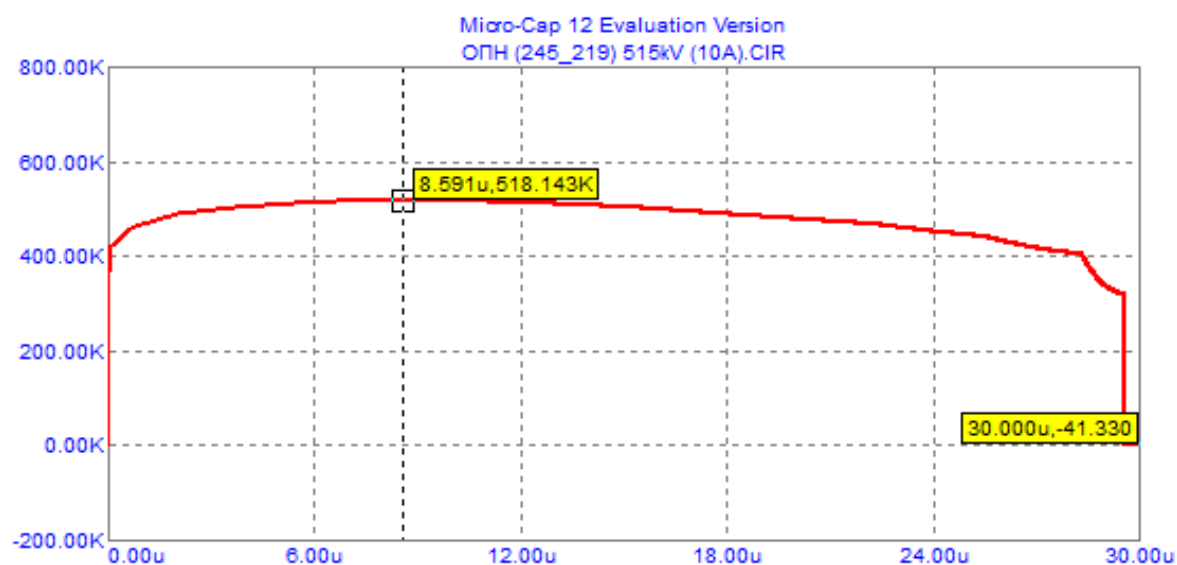
б)

Рис. 3.2.7. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-216 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 245-216: 503,454 кВ та 511,1 кВ відповідно.



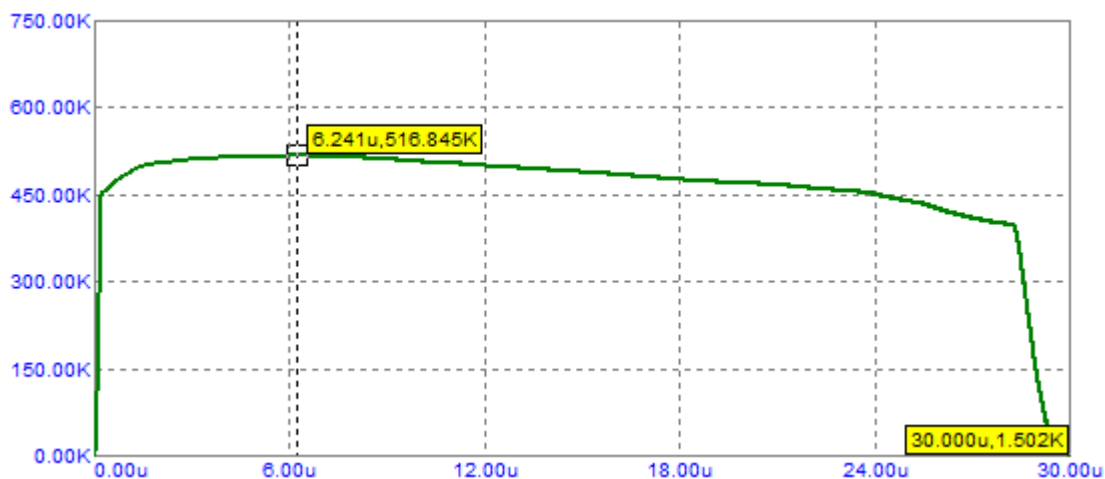
а)



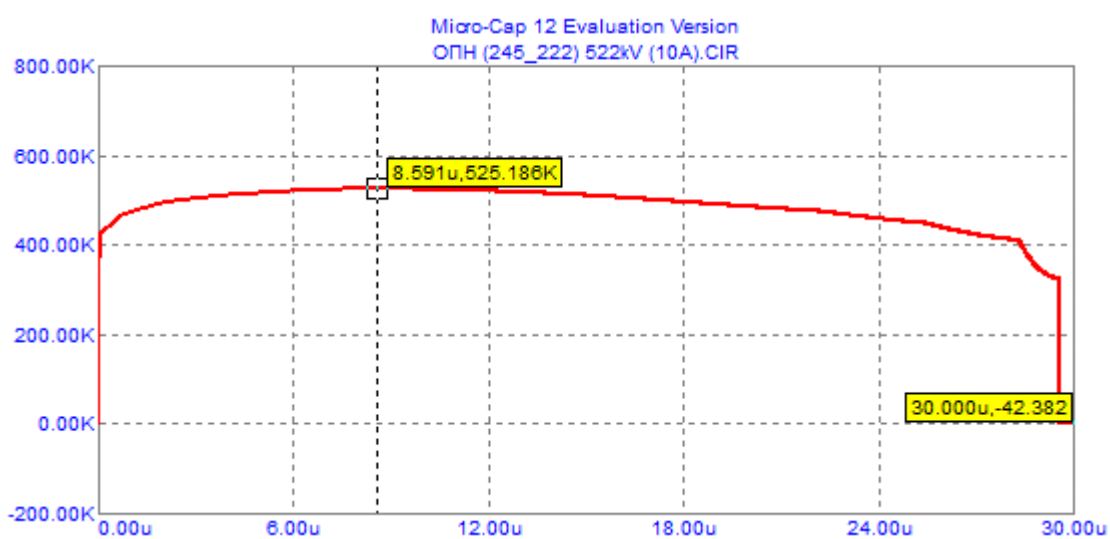
б)

Рис. 3.2.8. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-219 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 245-216: 510,149 кВ та 518,143 кВ відповідно.



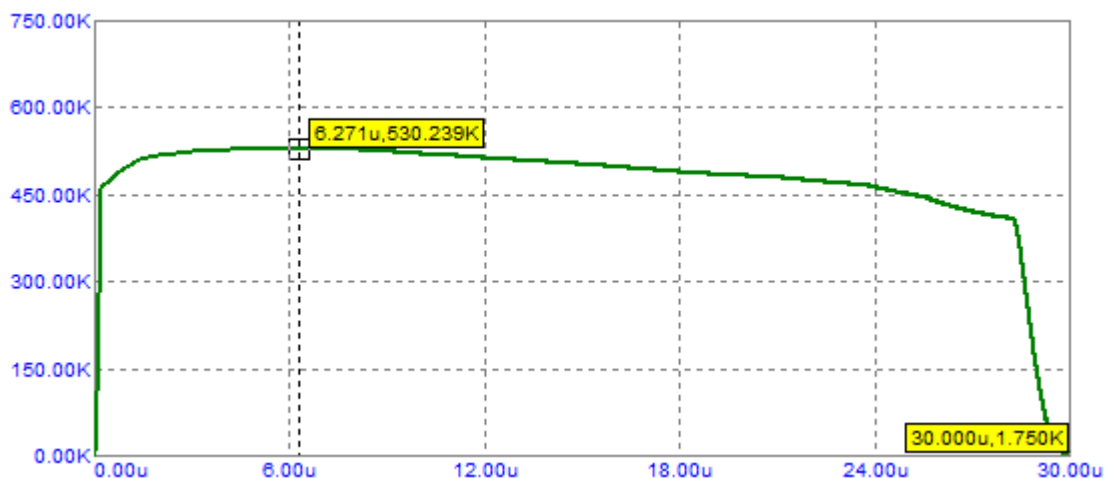
а)



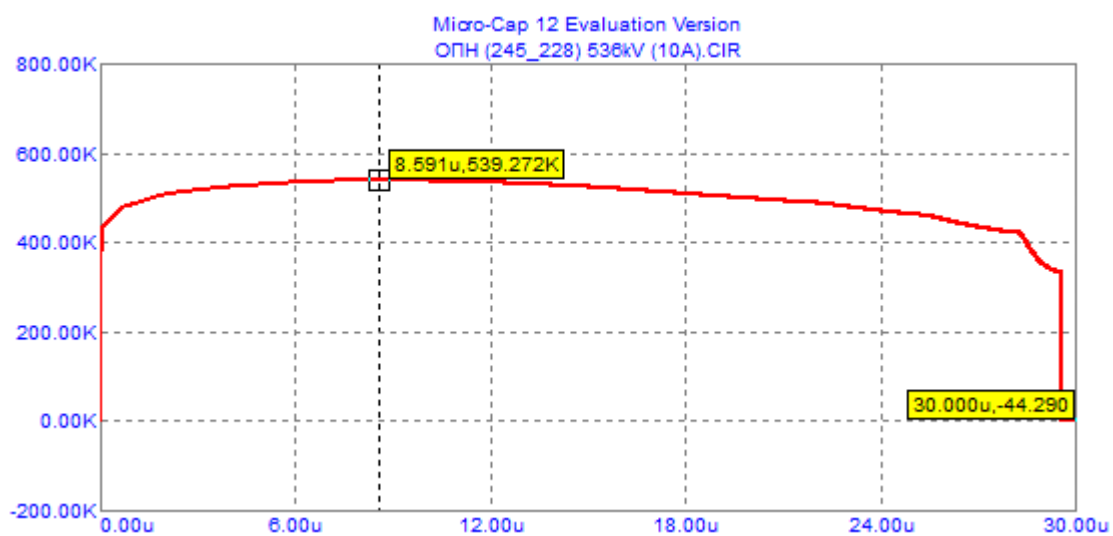
б)

Рис. 3.2.9. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-222 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 245-222: 516,845 кВ та 525,186 кВ відповідно.



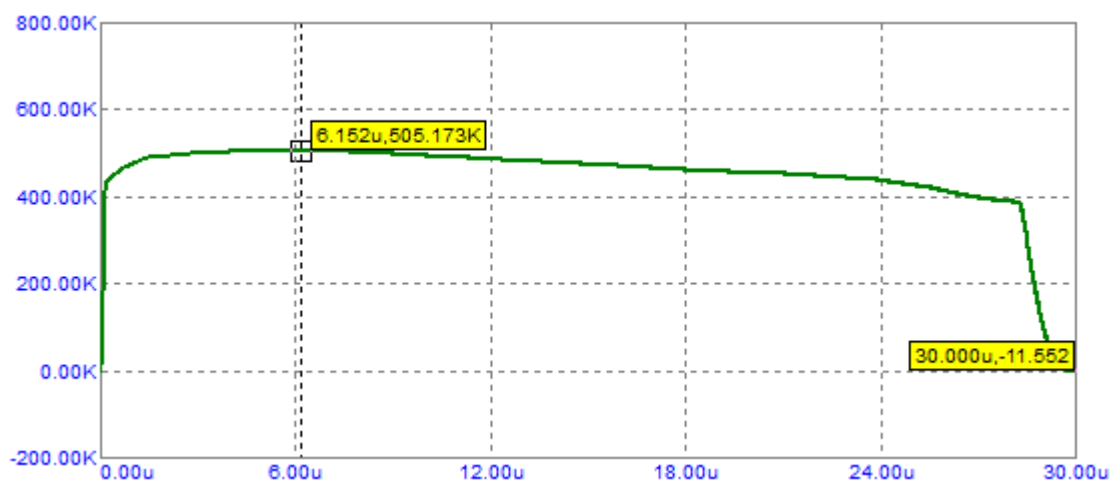
а)



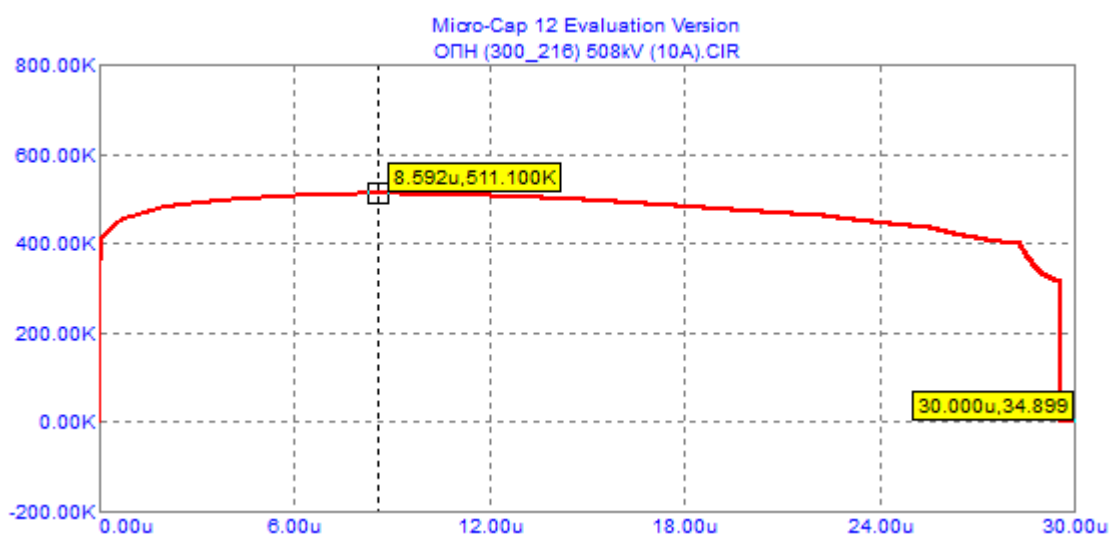
б)

Рис. 3.2.10. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 245-228 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 245-228: 530,239 кВ та 539,272 кВ відповідно.



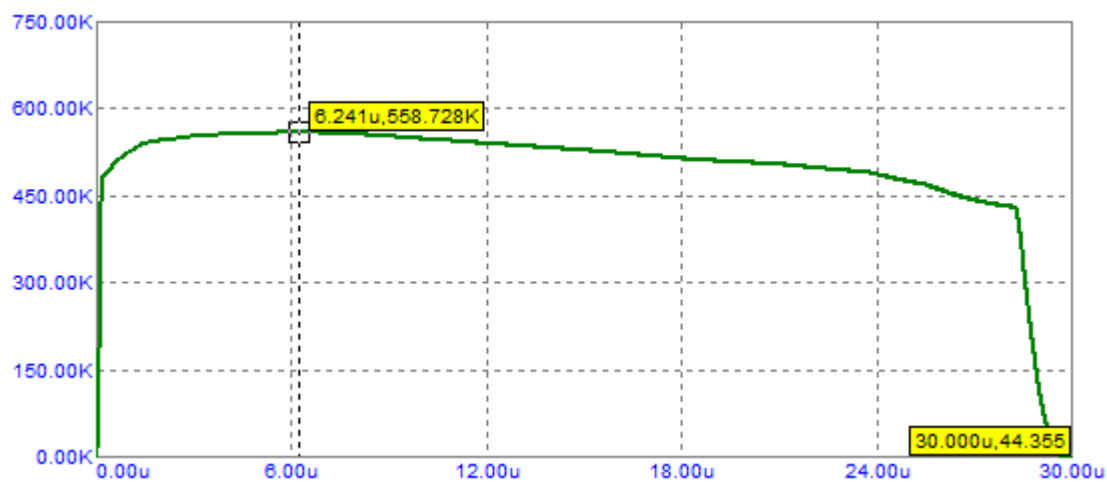
а)



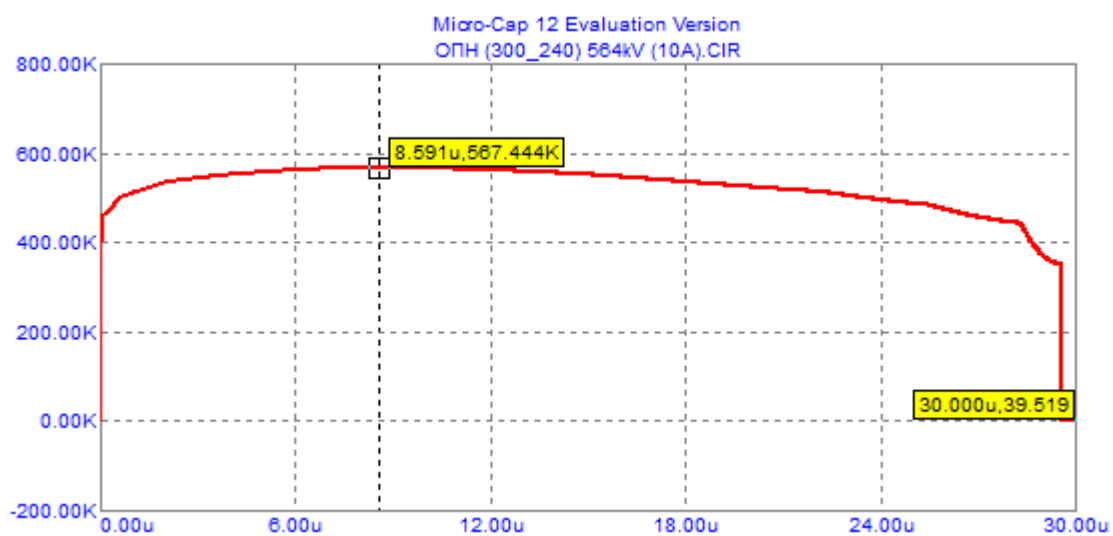
б)

Рис. 3.2.11. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 300-216 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-216: 505,173 кВ та 511,100 кВ відповідно.



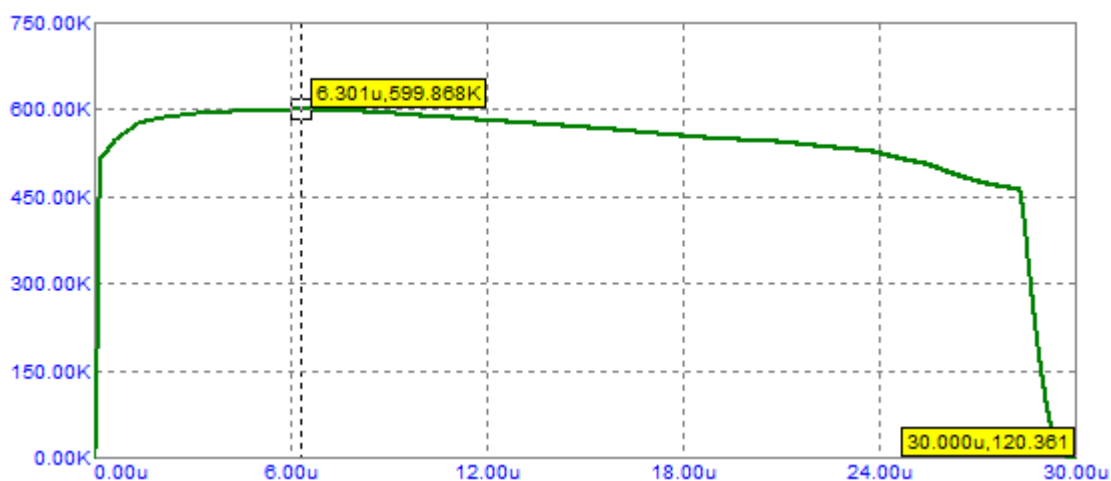
а)



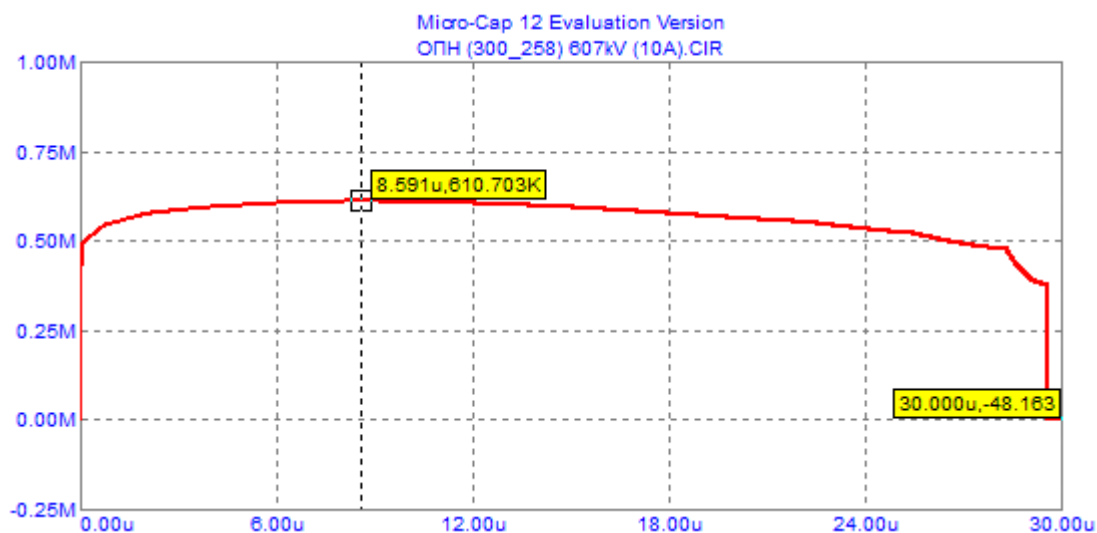
б)

Рис. 3.2.12. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 300-240 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-240: 558,728 кВ та 567,444 кВ відповідно.



а)

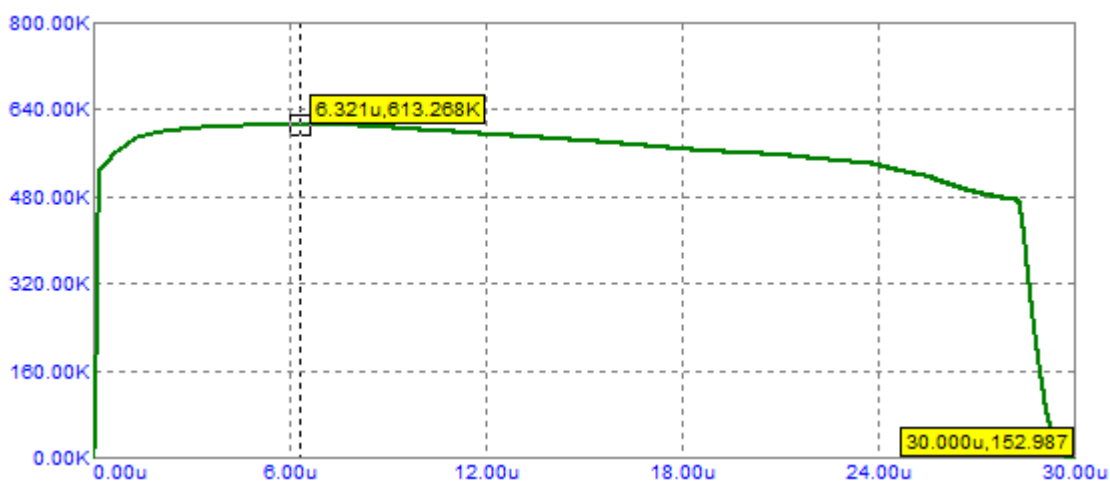


б)

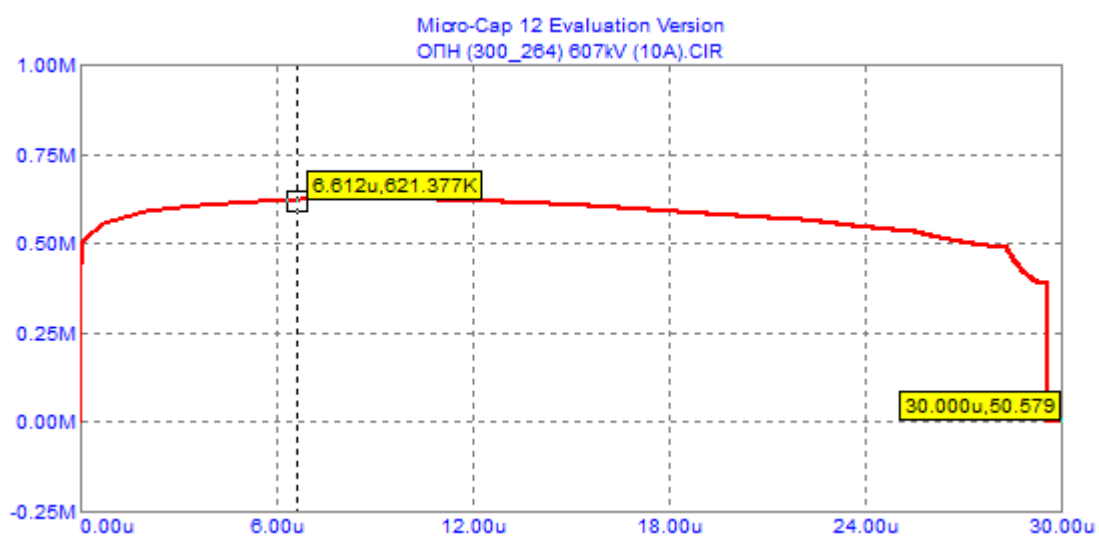
Рис. 3.2.13. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 300-258 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-258: 599,868 кВ та 610,703 кВ відповідно.





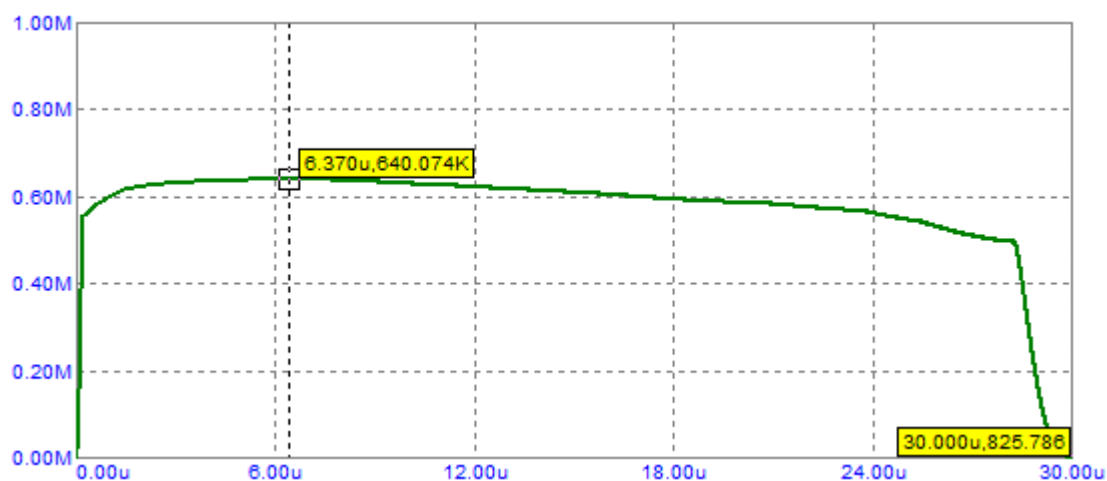
а)



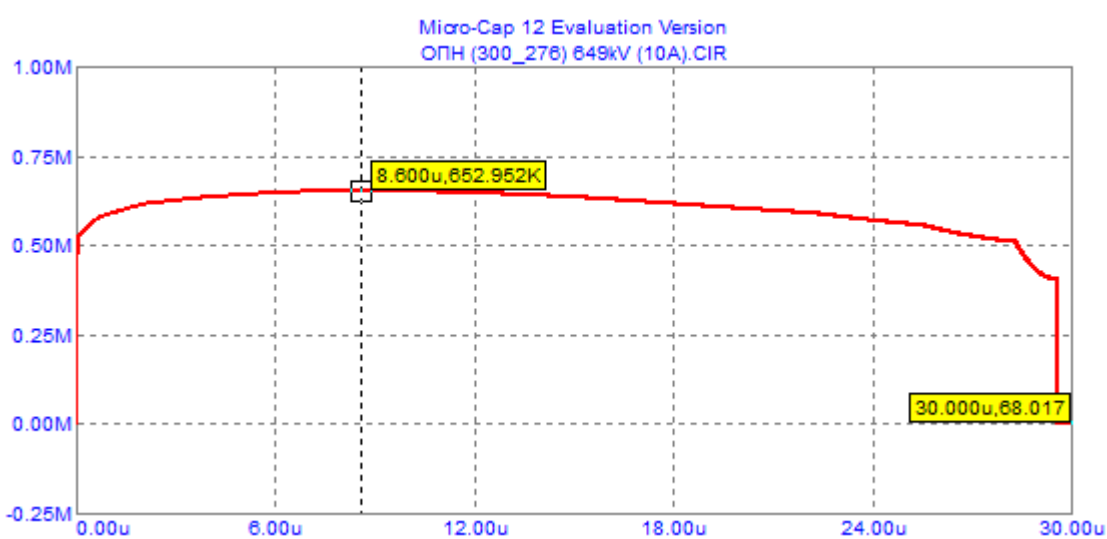
б)

Рис. 3.2.14. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 300-264 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-264: 613,268 кВ та 621,377 кВ відповідно.



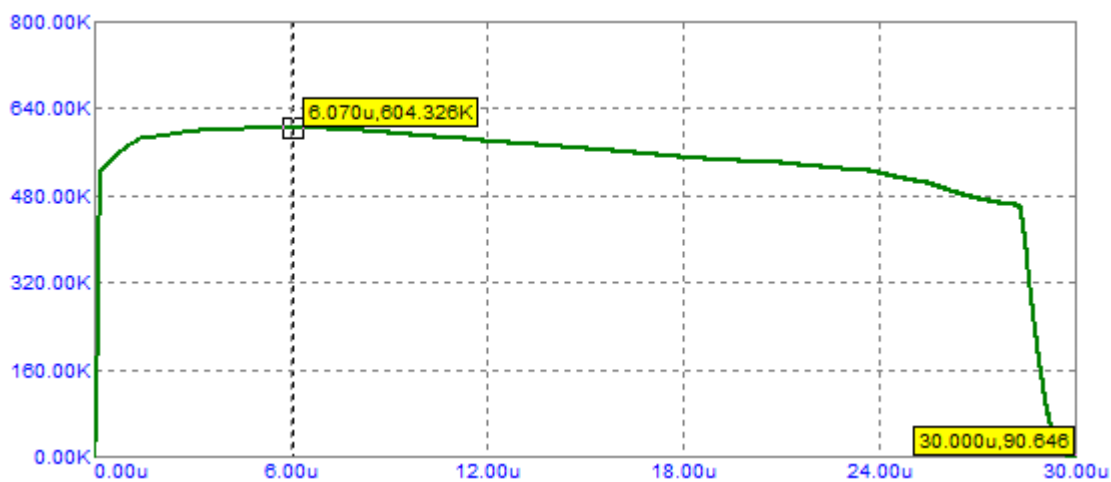
а)



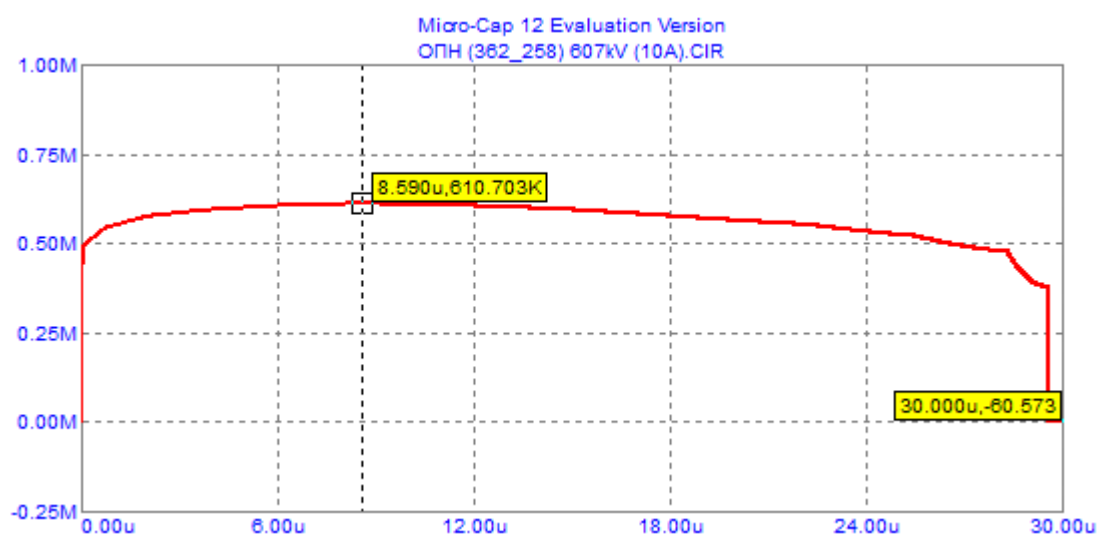
б)

Рис. 3.2.15. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 300-276 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-276: 640,074 кВ та 652,952 кВ відповідно.



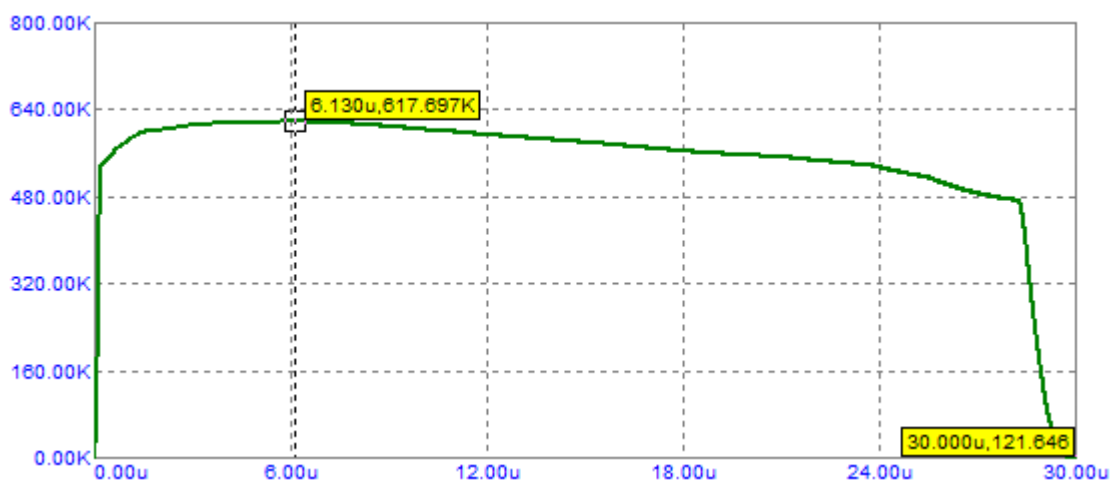
а)



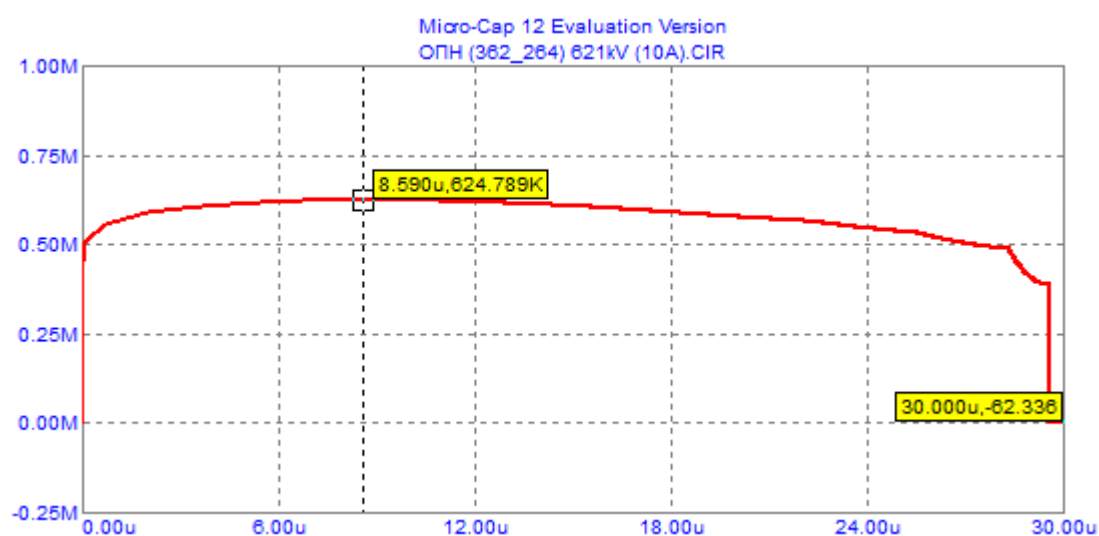
б)

Рис. 3.2.16. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 362-258 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 362-258: 604,326 кВ та 610,703 кВ відповідно.



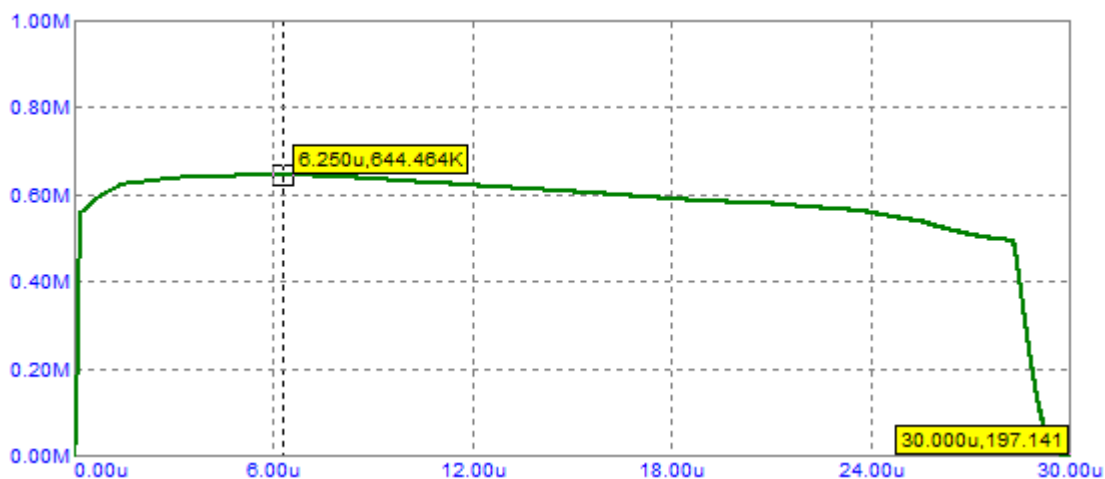
а)



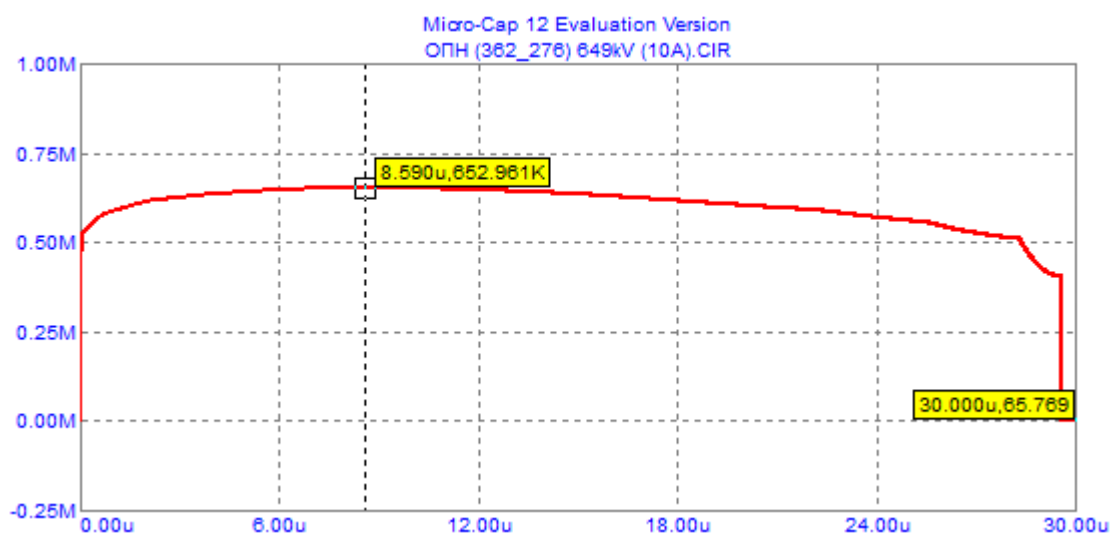
б)

Рис. 3.2.17. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 362-264 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 362-264: 617,697 кВ та 624,789 кВ відповідно.



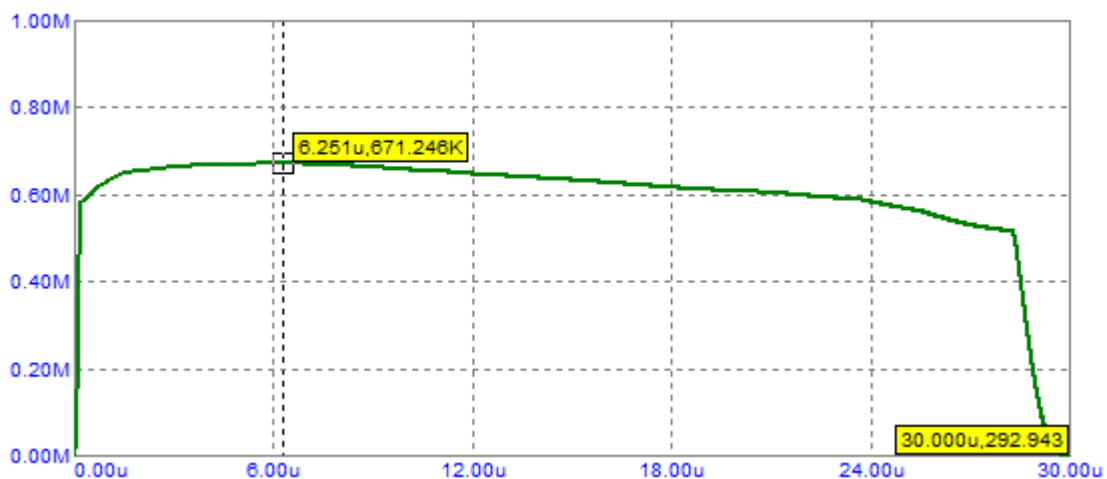
а)



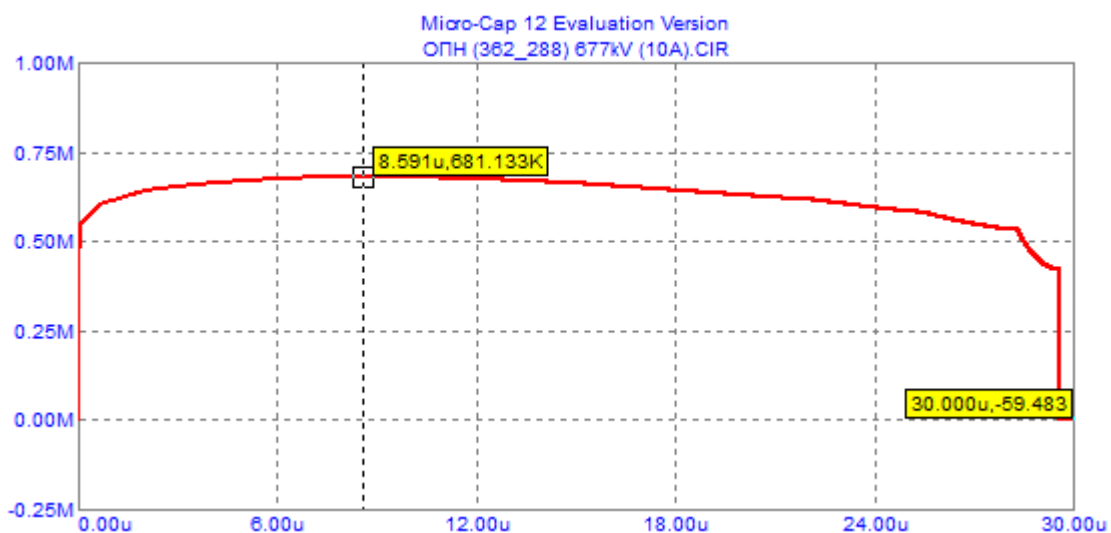
б)

Рис. 3.2.18. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 362-276 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 362-276: 644,464 кВ та 652,961 кВ відповідно.



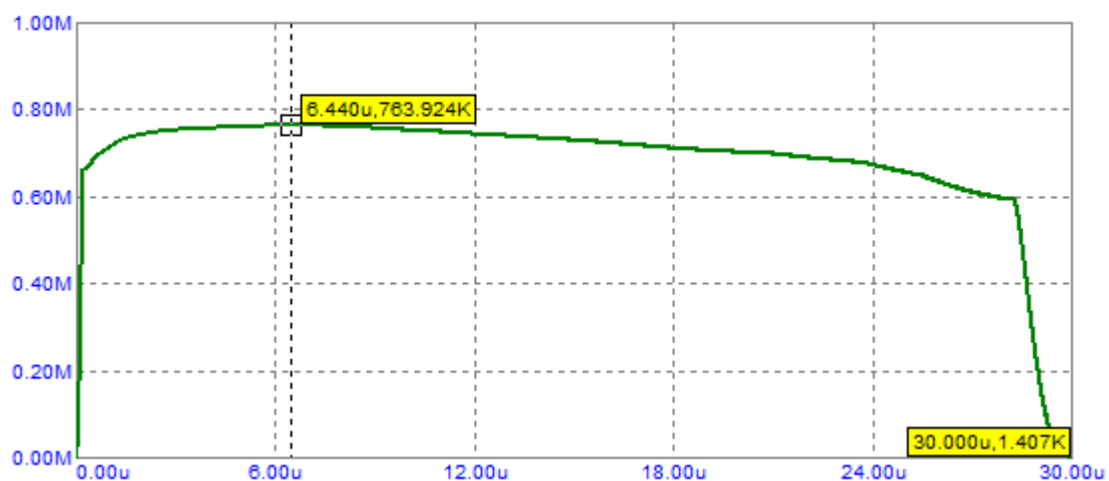
а)



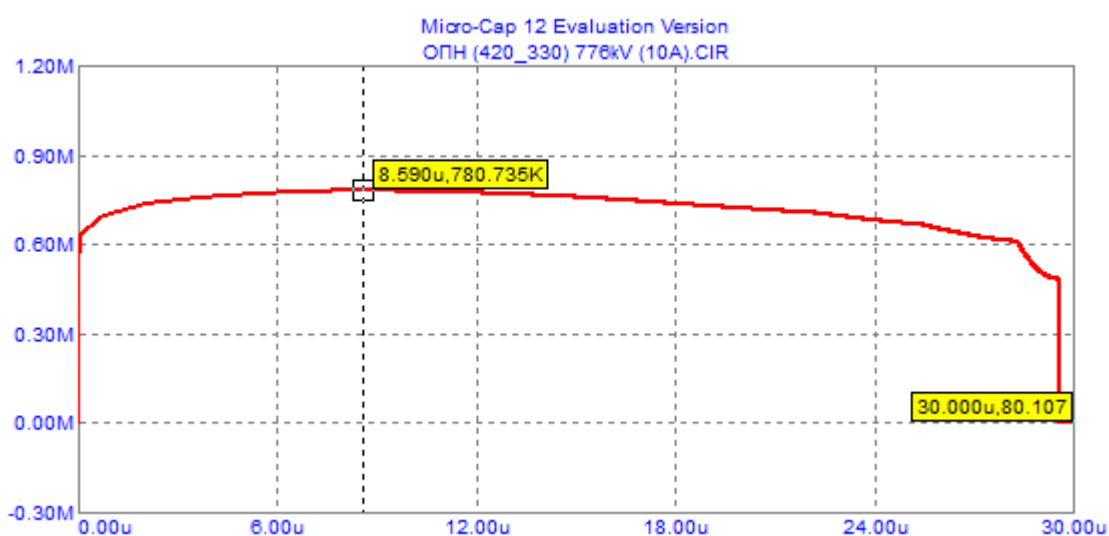
б)

Рис. 3.2.19. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 362-288 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 362-288: 671,246 кВ та 681,133 кВ відповідно.



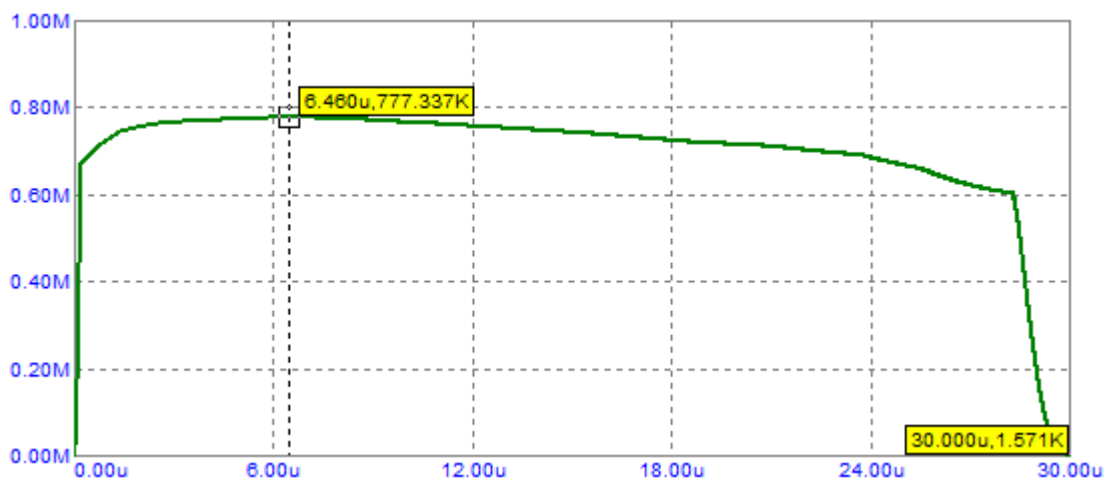
а)



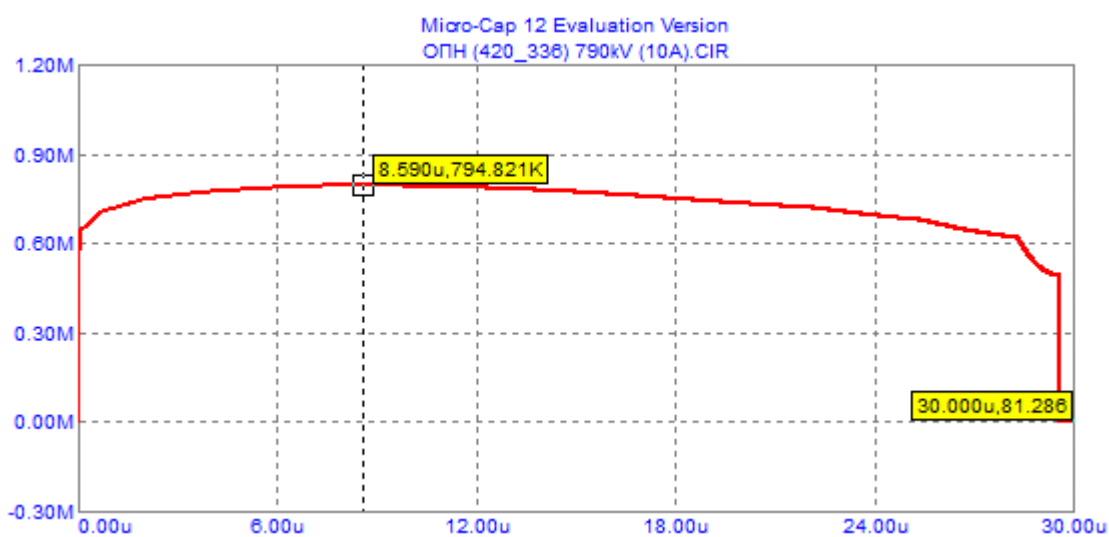
б)

Рис. 3.2.20. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 420-330 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 420-330: 763,924 кВ та 780,735 кВ відповідно.



а)

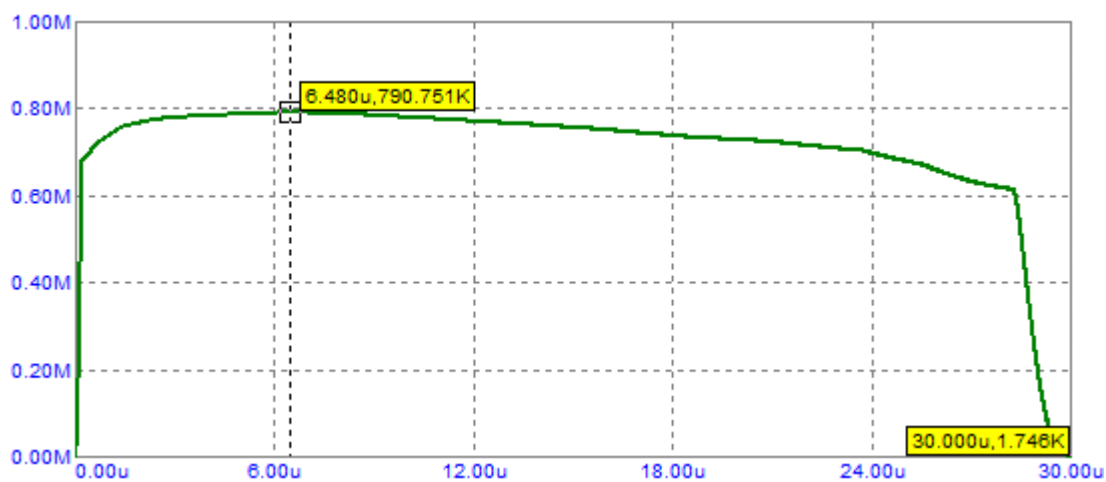


б)

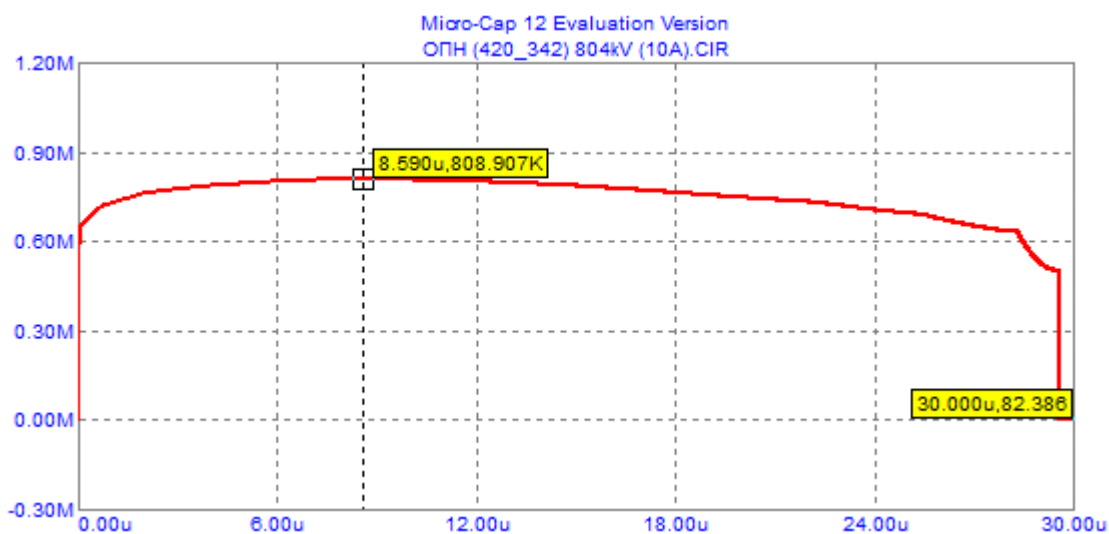
Рис. 3.2.21. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 420-336 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 420-336: 777,337 кВ та 794,821 кВ відповідно.





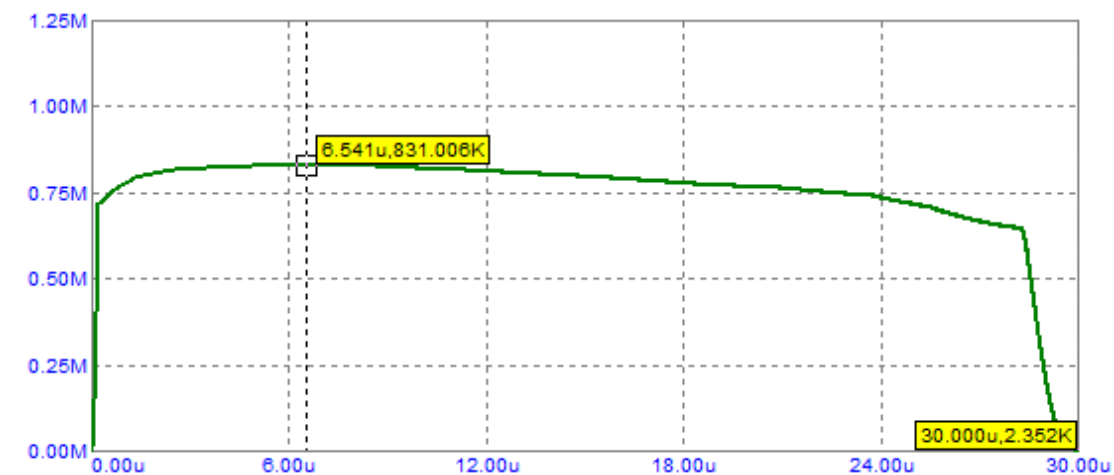
а)



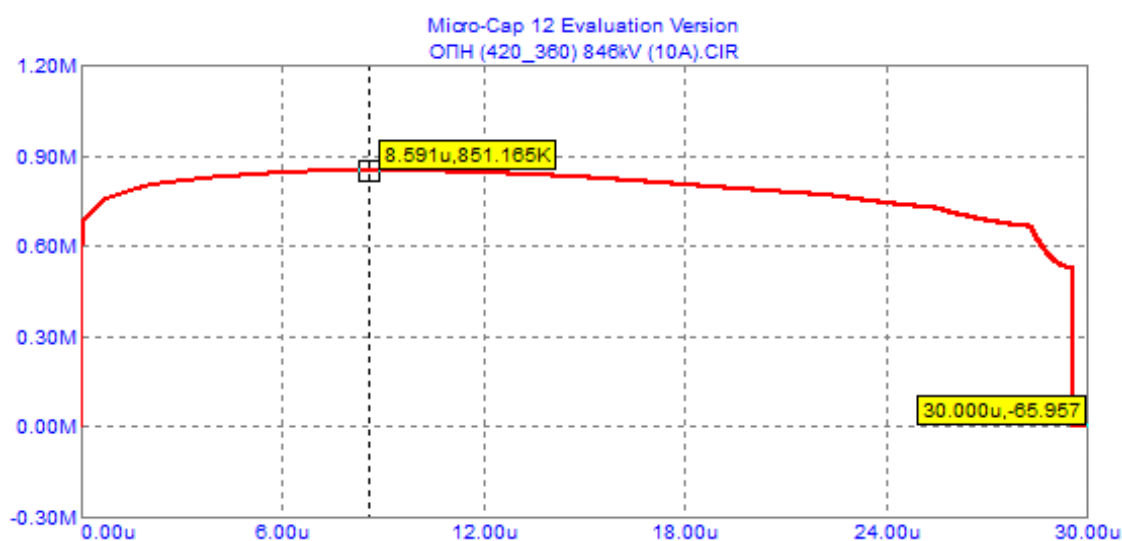
б)

Рис. 3.2.22. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 420-342 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 420-342: 790,751 кВ та 808,907 кВ відповідно.



а)



б)

Рис. 3.2.23. Криві , що показують залишкову напругу в ОПН PERLIM Q 420-360 при проходженні через нього струму 10 кА: а) – повна модель; б) – спрощена модель

Отримані значення залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 420-360: 831,006 кВ та 851,165 кВ відповідно.

Аби порівняти дані моделі було пораховано відносні похибки залишкової напруги при імпульсі струму 10 кА. Результати порівняння зведено до таблиці 7.

Таблиця 7. Відносні похибки ОПН серії PERLIM Q при імпульсі струму 10 кА.

ОПН	Імпульс струму (амплітуда, форма хвилі)	Максимальна залишкова напруга, кВ					Відносна похибка, %			
		Каталог	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель
PERLIM Q 245-210	10 кА, 8/20 мкс	494	490,06	497,014	498,834	498,835	-0,797	0,610	0,979	0,979
PERLIM Q 245-216		508	503,45	511,1	513,418	513,42	-0,895	0,610	1,067	1,067
PERLIM Q 245-219		515	510,14	518,143	520,18	520,181	-0,942	0,610	1,006	1,006
PERLIM Q 245-222		522	516,84	525,186	527,313	527,314	-0,988	0,610	1,018	1,018
PERLIM Q 245-228		536	530,23	539,272	541,905	541,906	-1,075	0,610	1,102	1,102
PERLIM Q 300-216		508	505,1	511,1	513,418	513,423	-0,556	0,610	1,067	1,068

Таблиця 7 (продовження). Відносні похибки ОПН серії PERLIM Q при імпульсі струму 10 кА.

ОПН	Імпульс струму (амплітуда, форма хвилі)	Максимальна залишкова напруга, кВ					Відносна похибка, %			
		Каталог	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель
PERLIM Q 300-240	10 кА 8/20 мкс	564	558,72	567,444	569,829	569,834	-0,935	0,611	1,034	1,034
PERLIM Q 300-258		607	599,868	610,703	612,767	612,772	-1,175	0,610	0,950	0,951
PERLIM Q 300-264		621	613,268	621,377	627,4	627,405	-1,245	0,061	1,031	1,031
PERLIM Q 300-276		649	640,074	652,952	655,838	655,84	-1,375	0,609	1,054	1,054
PERLIM Q 362-258		607	604,326	610,703	612,767	612,772	-0,441	0,610	0,950	0,951
PERLIM Q 362-264		621	617,697	624,789	627,4	627,405	-0,532	0,610	1,031	1,031
PERLIM Q 362-276		649	644,464	652,961	655,838	655,84	-0,699	0,610	1,054	1,054

Таблиця 7 (продовження). Відносні похибки ОПН серії PERLIM Q при імпульсі струму 10 кА.

ОПН	Імпульс струму (амплітуда, форма хвилі)	Максимальна залишкова напруга, кВ					Відносна похибка, %			
		Каталог	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель	Повна модель (1992)	Спро-щена модель (2004)	Модель 1	Удосконалена модель
PERLIM Q 362-288	10 кА 8/20 мкс	677	671,246	681,133	683,854	683,859	-0,850	0,610	1,012	1,013
PERLIM Q 420-330		776	763,92	780,735	783,808	783,806	-1,556	0,610	1,006	1,006
PERLIM Q 420-336		790	777,33	794,821	798,308	798,309	-1,603	0,610	1,052	1,052
PERLIM Q 420-342		804	790,75	808,907	812,295	812,296	-1,648	0,610	1,032	1,032
PERLIM Q 420-360		846	831	851,165	854,966	854,968	-1,772	0,611	1,060	1,060

### 3.3. Моделювання схем ОПН при впливі на них імпульсів напруги з використанням апроксимації вольт-амперної характеристики.

Схеми для визначення падіння напруги між виводами ОПН при дії на нього імпульсів напруги для ОПН серії PERLIM Q 245-210 наведені нижче на рис. 3.3.1. Остання схема удосконалена.

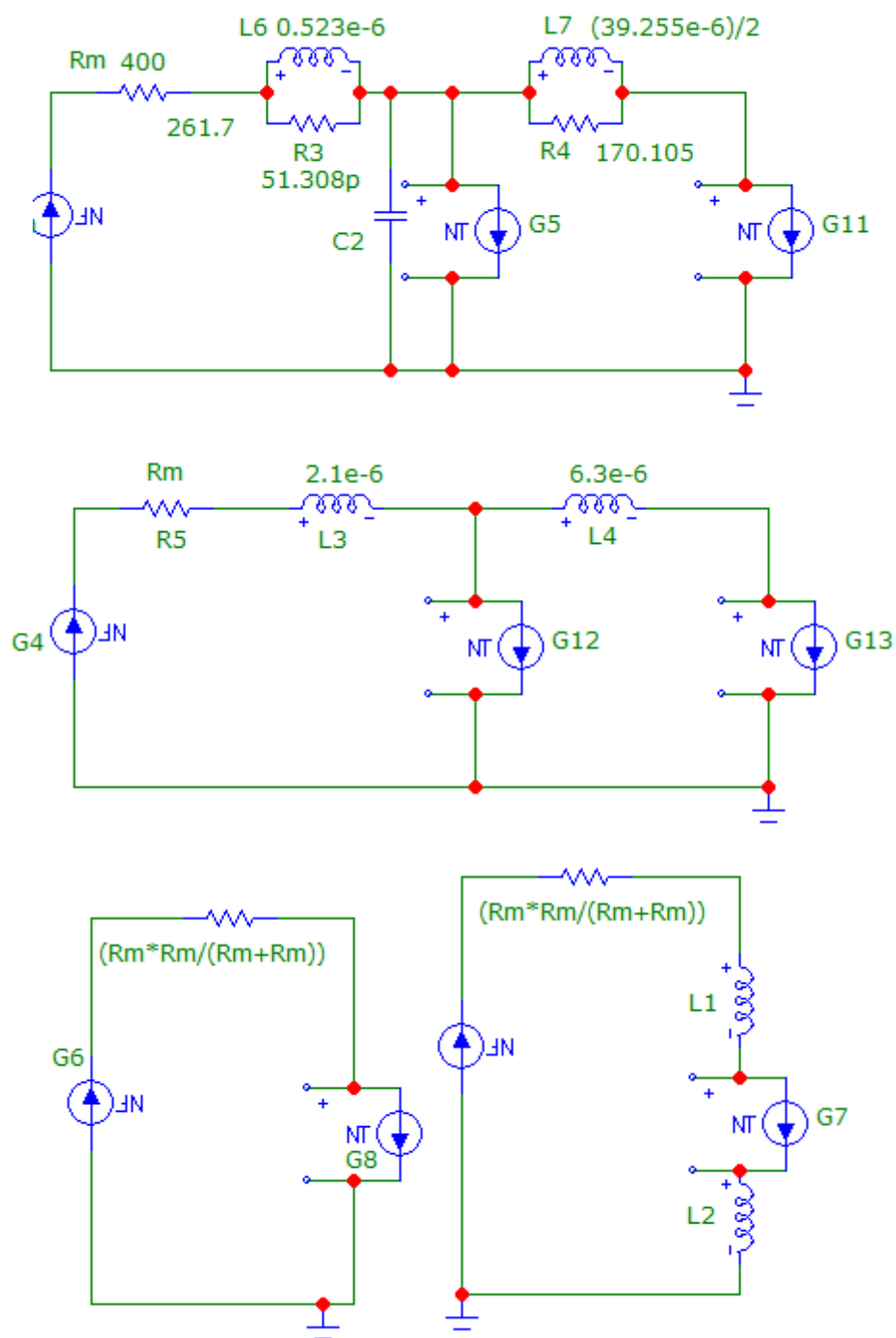


Рис. 3.3.1. Реалізація схем для ОПН серії PERLIM Q 245-210.

До електричного кола уже запропонованої схеми (в) додано дві індуктивності  $L1$  та  $L2$  - це індуктивності з'єднувальних проводів між фазою і ОПН та між ОПН та землею відповідно. Згідно з [14]  $L1$  та  $L2$  розраховуються за формулами:

$$L1 = l1 * L', \text{ мкГн} \quad (6)$$

$$L2 = l2 * L', \text{ мкГн} \quad (7)$$

де  $l1$  та  $l2$  – довжина проводів між фазою і ОПН та між ОПН і землею (рис. 3.3.1.),  $L'$  - це погона індуктивність проводів, що дорівнює 1 мкГн/м згідно [14]. Для даного дослідження було прийнято усереднене значення  $l1 = 10$  м та  $l2 = 4$  м.

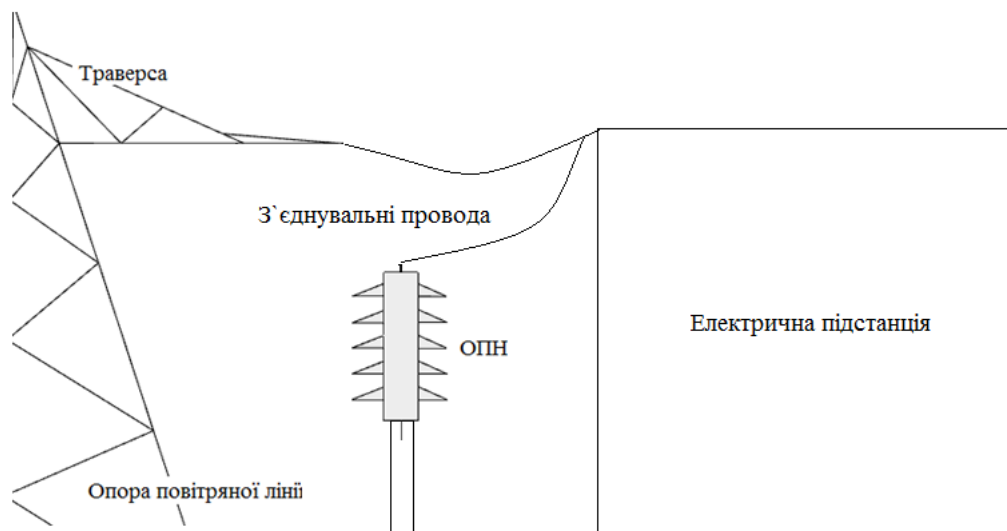


Рис. 3.3.2. Типове приєднання ОПН

Схеми на рис. 3.3.1. відповідають випадку, коли до ОПН підключені дві лінії нескінченної довжини. При цьому по одній з них на ОПН доходить хвиля перенапруги (формою 1,2/50 мкс). В схемах на рис. 3.3.1. плече з ОПН залишено без змін, а інша частина схеми замінена еквівалентним джерелом напруги та еквівалентним резистором. Оскільки в роботі розглядаються ОПН класом напруги мережі 245,300,362 та 420 кВ, тому для таких мереж хвильовий опір складає 400, 400, 350, 325 Ом відповідно [15].

Відповідно до теореми Тевенена еквівалентне джерело напруги в даному досліді визначається за формулою:

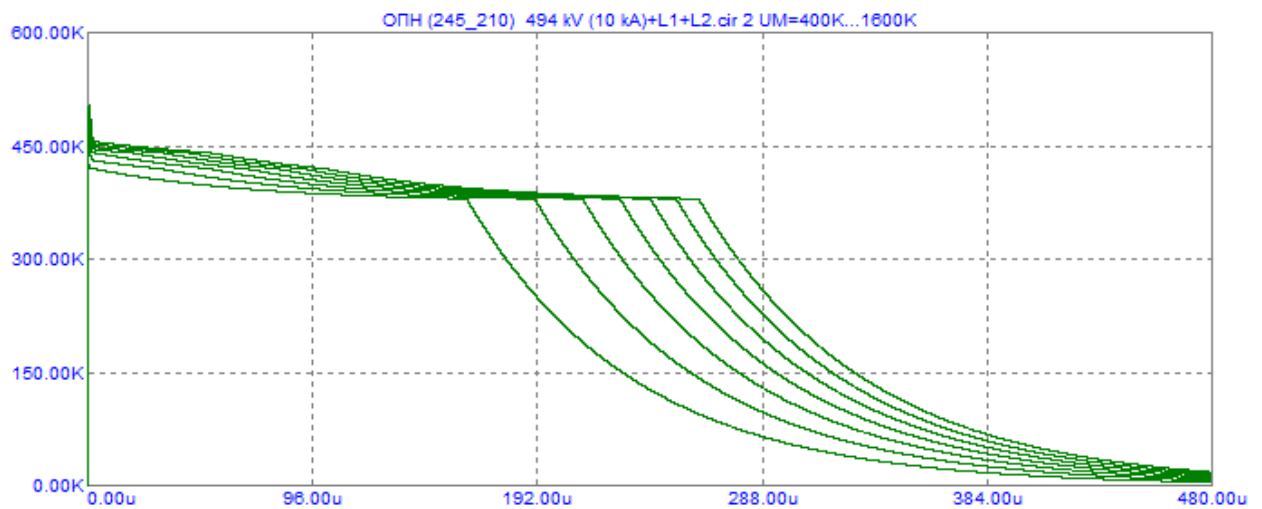
$$e_1 = \frac{2 * R_{\text{хвил}}}{R_{\text{хвил}} + R_{\text{хвил}}} * 1,044 ** (e^{-1,400 * 10^4 * t} - e^{-1,917 * 10^6 * t}), \quad (7)$$

де  $U_m$  - пікове значення напруги, В.

Еквівалентний опір дорівнює, Ом:

$$R_3 = \frac{R_{\text{хвил}} * R_{\text{хвил}}}{R_{\text{хвил}} + R_{\text{хвил}}} \quad (8)$$

Результати моделювання для ОПН серії PERLIM Q 245-210 показані на рис.3.3.3.



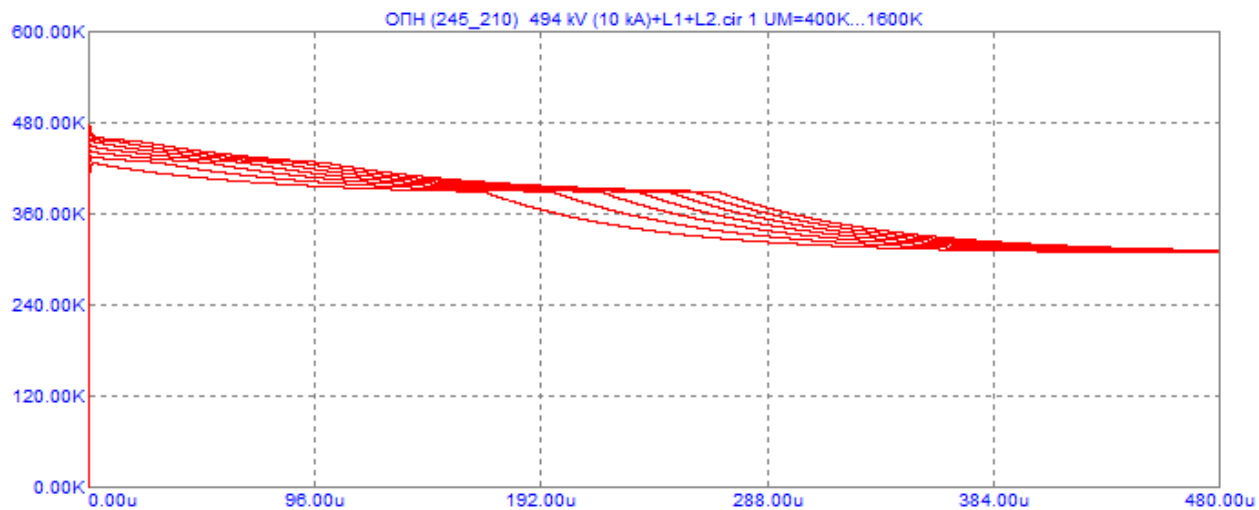
а)

Рис. 3.3.3. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-210: а) – повна модель;

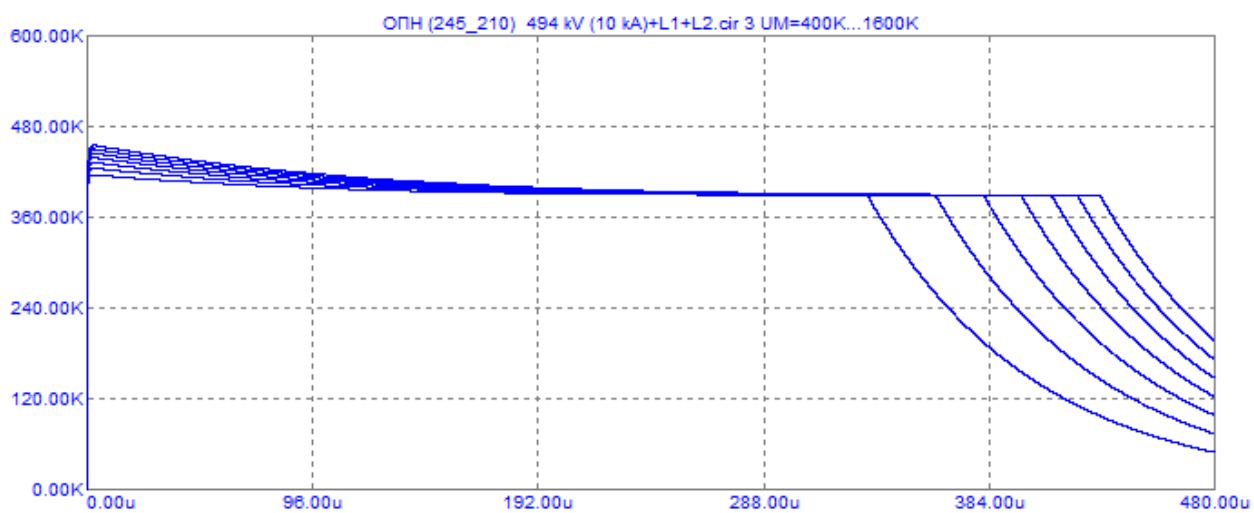
Результати моделювання за допомогою повної, спрощеної моделі 2004 року та двох моделей запропонованих на кафедрі ТЕВН інших випробних ОПН, а саме моделей PERLIM Q : 245-216, 245-219, 245-222, 245-228, 300-216, 300-240, 300-258, 300-264, 300-276, 362-258, 362-264, 362-276, 362-288, 420-330, 420-336, 420-342, 420-360 наведені нижче у вигляді графіків сімейств



кривих залишкової напруги при струмі 10 кА (рис.3.3.4.- рис.3.3.19).

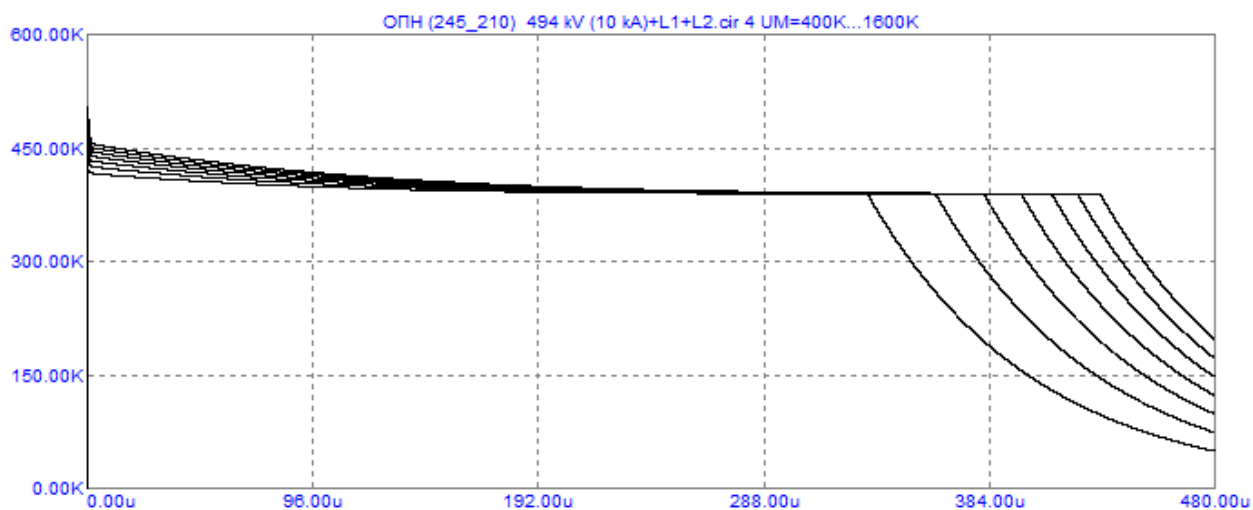


б)



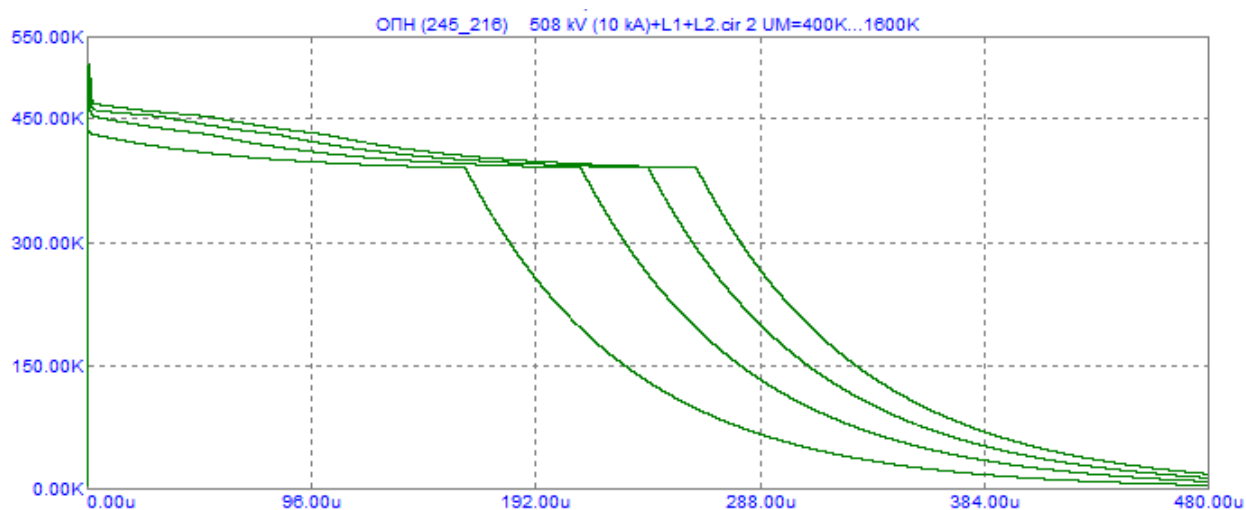
в)

Рис. 3.3.3. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-210 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



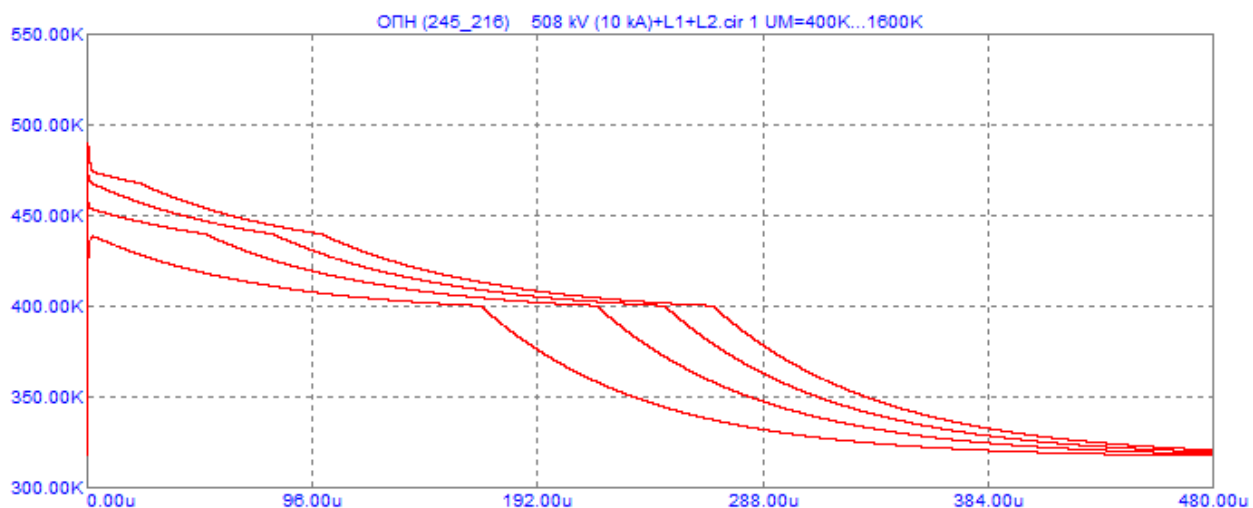
г)

Рис. 3.3.3. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-210 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

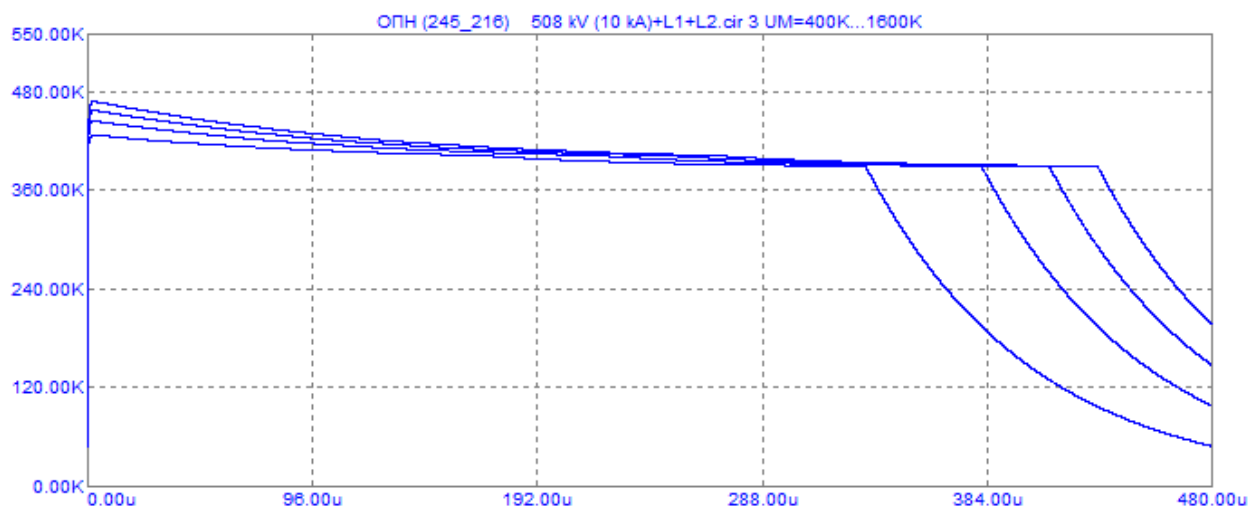


а)

Рис. 3.3.4. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-216: а) – повна модель;

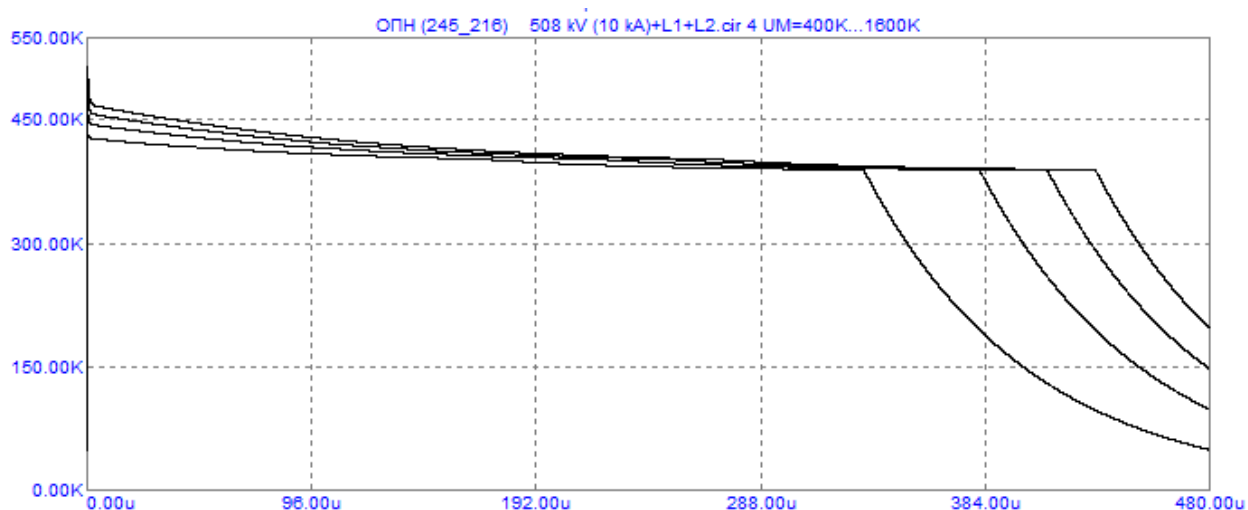


б)



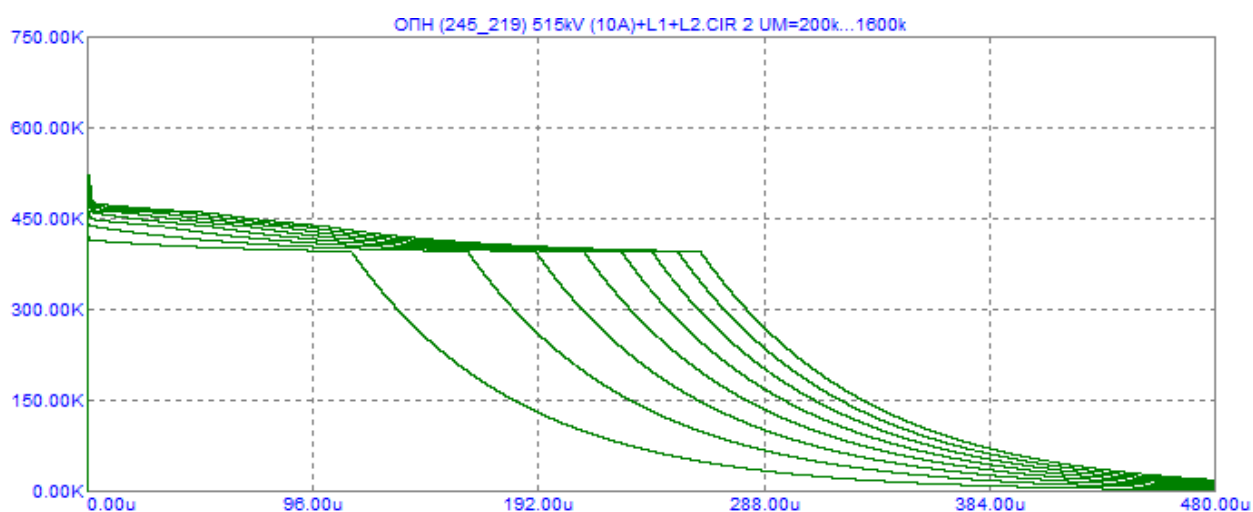
в)

Рис. 3.3.4. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-216 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



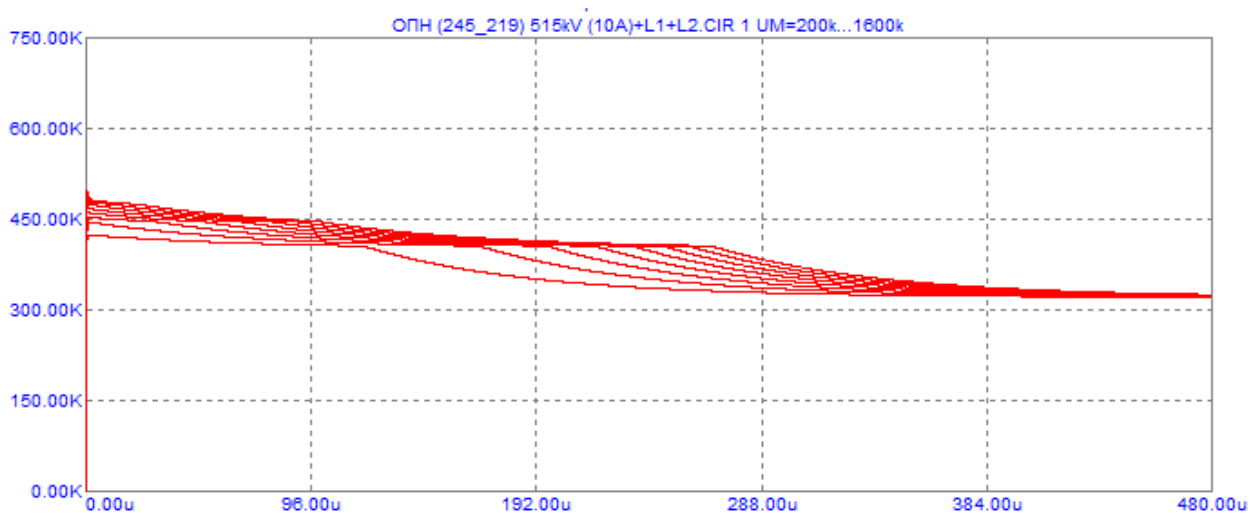
г)

Рис. 3.3.4. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-216 (продовження) : г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

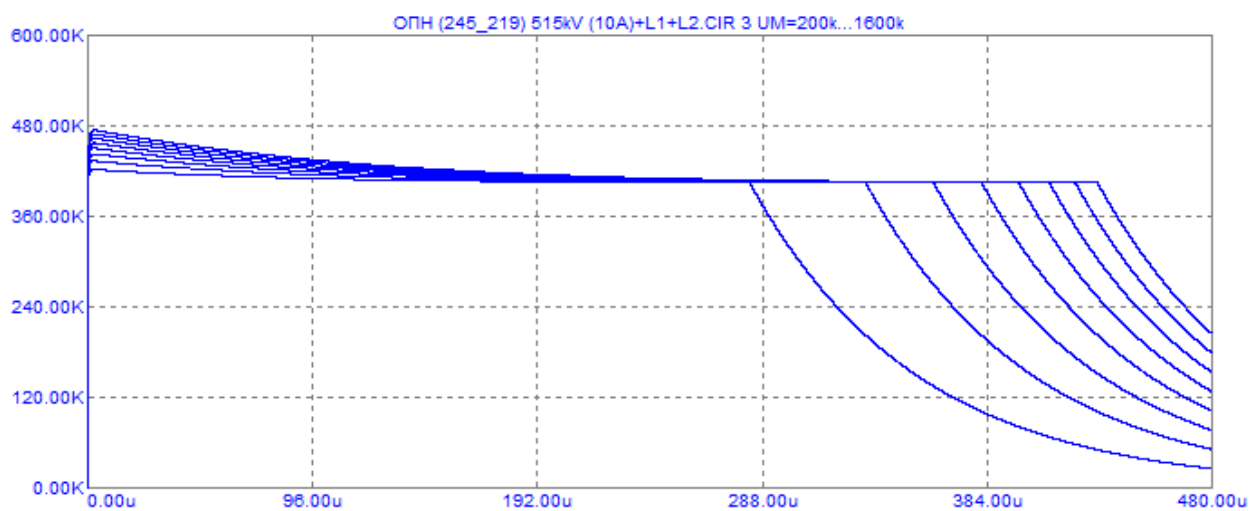


а)

Рис. 3.3.5. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-219: а) – повна модель;

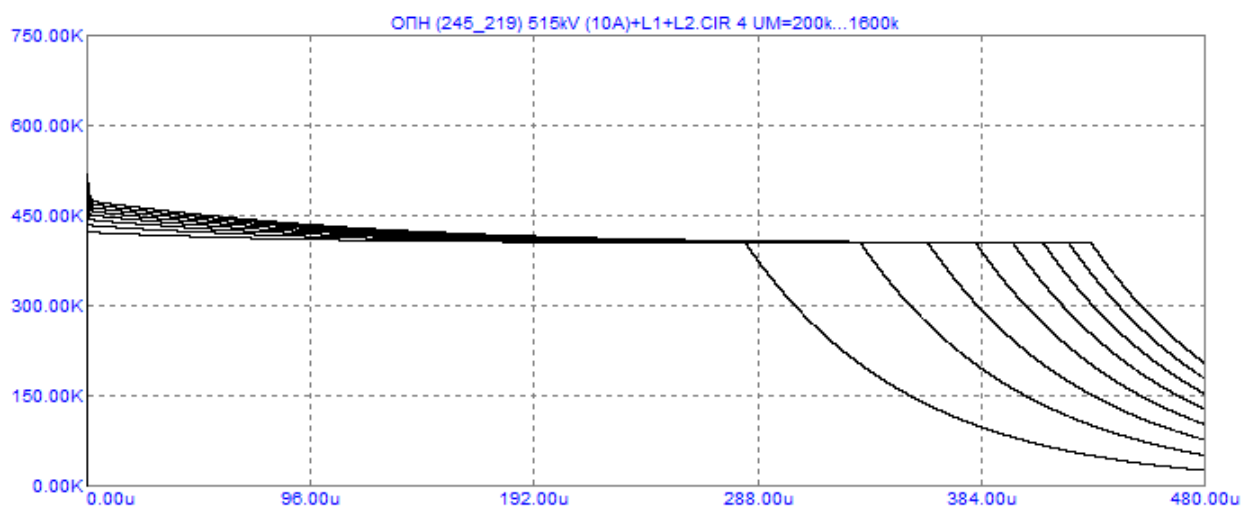


б)



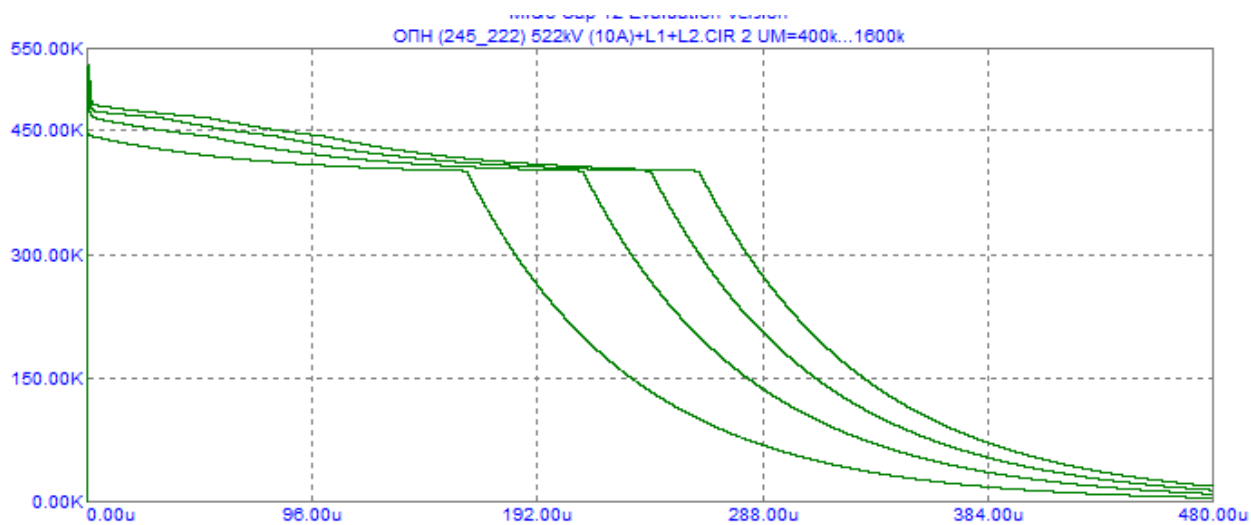
в)

Рис. 3.3.5. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-219 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



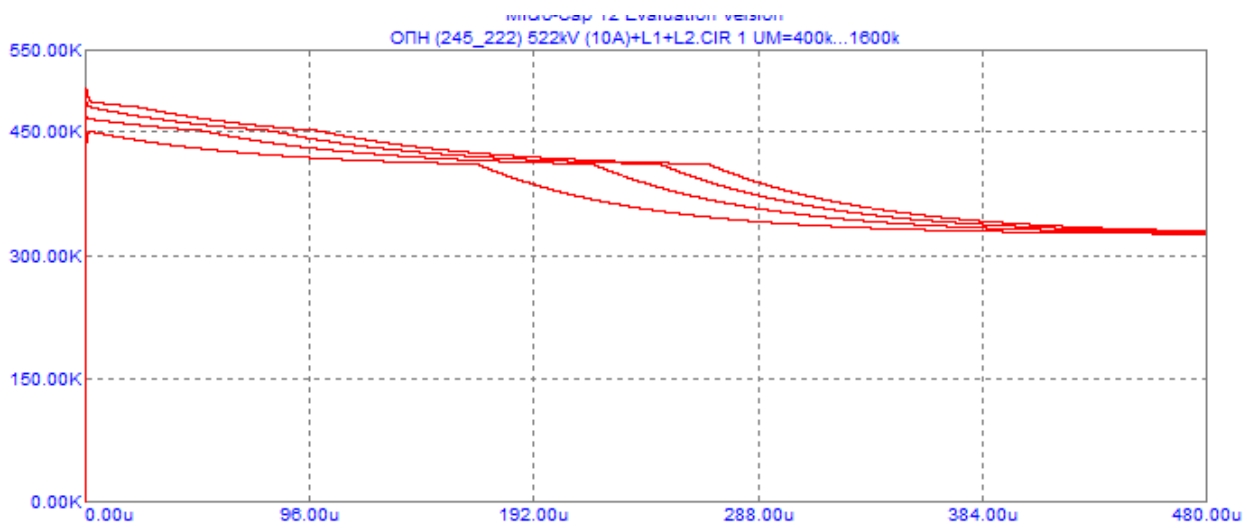
г)

Рис. 3.3.5. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-219 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

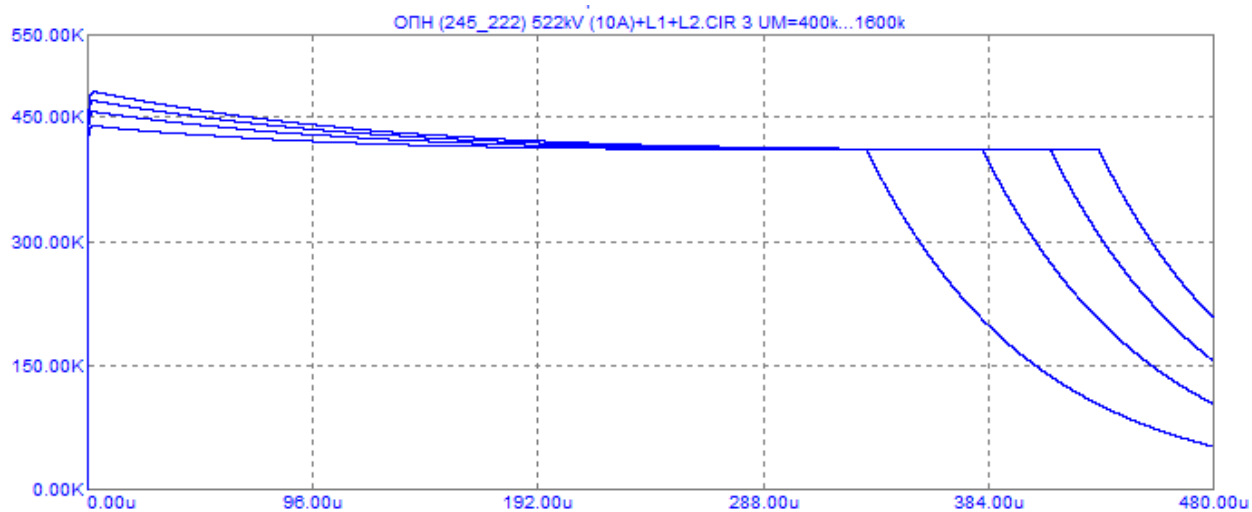


а)

Рис. 3.3.6. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-222: а) – повна модель;

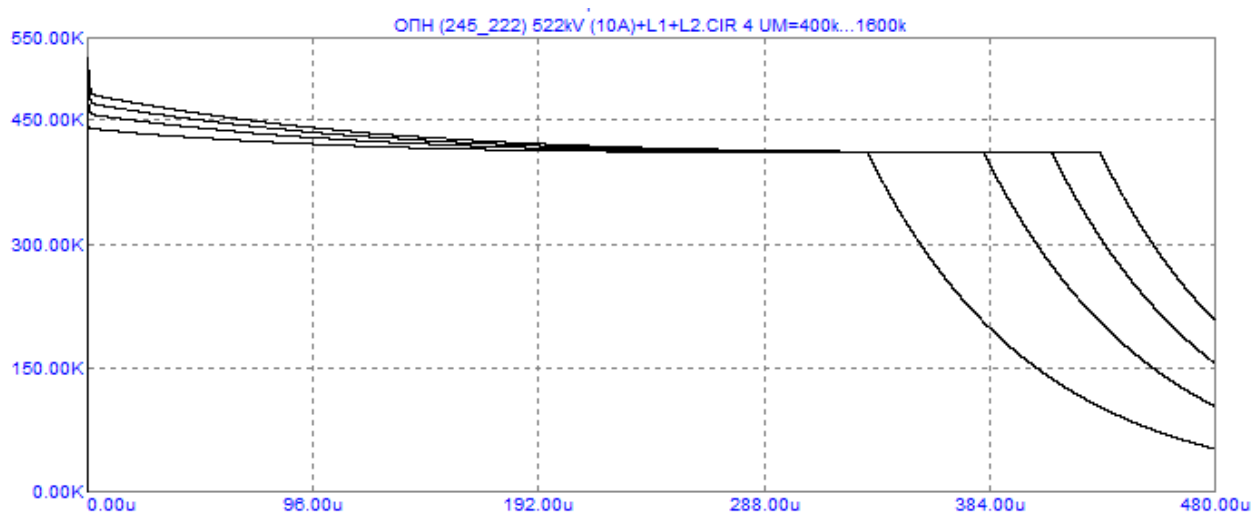


б)



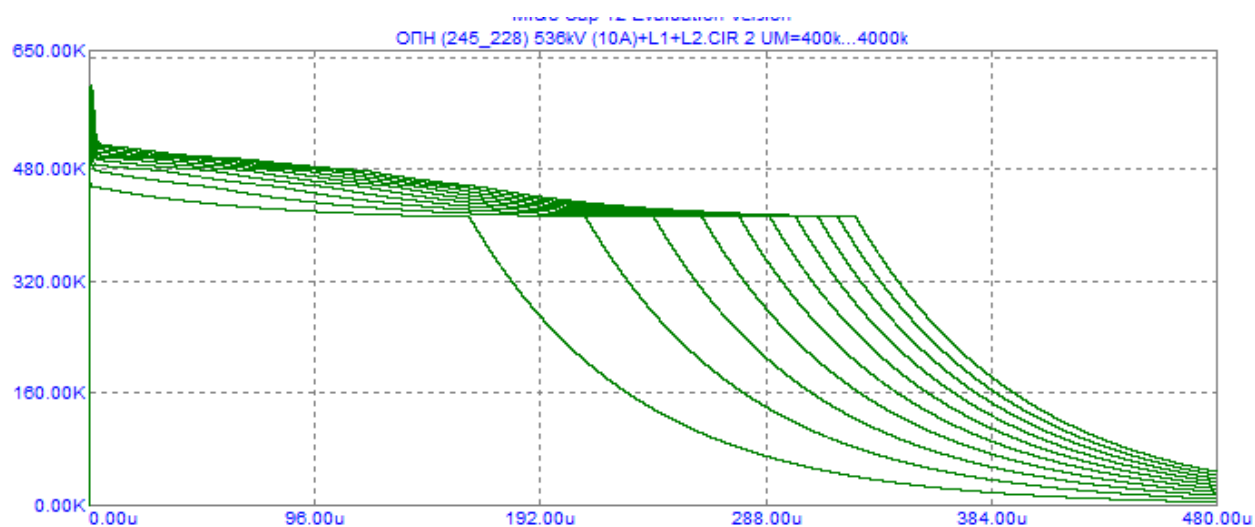
в)

Рис. 3.3.6. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-222 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



г)

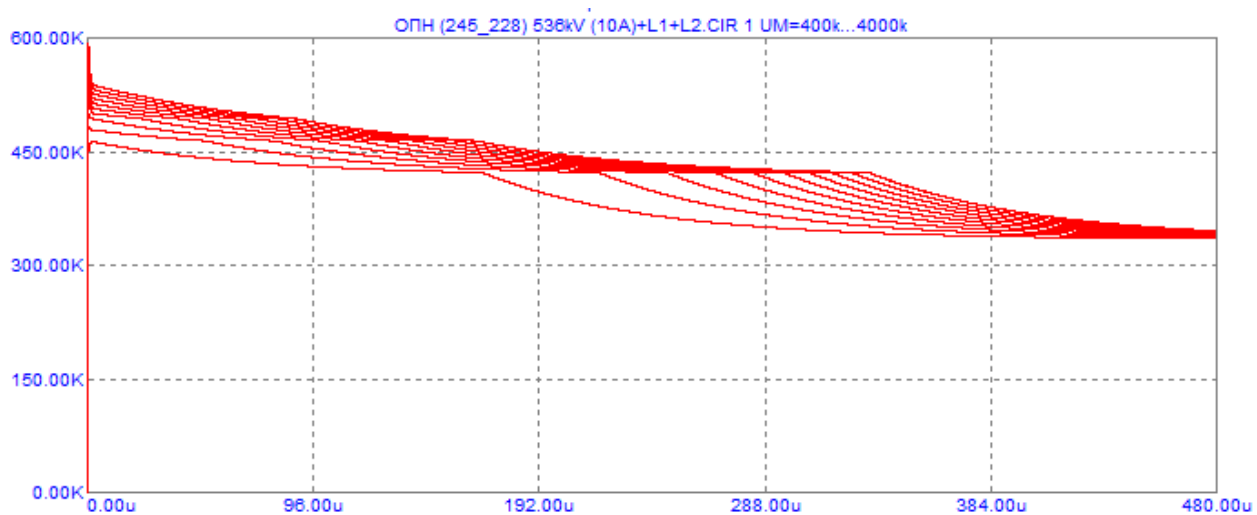
Рис. 3.3.6. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-222 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН



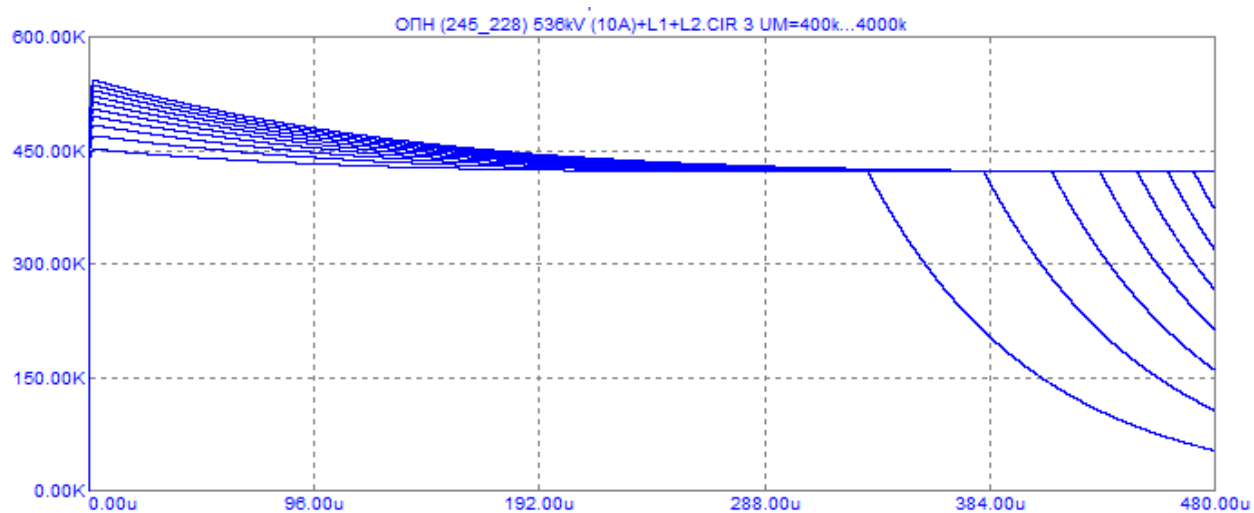
а)

Рис. 3.3.7. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-228: а) – повна модель;



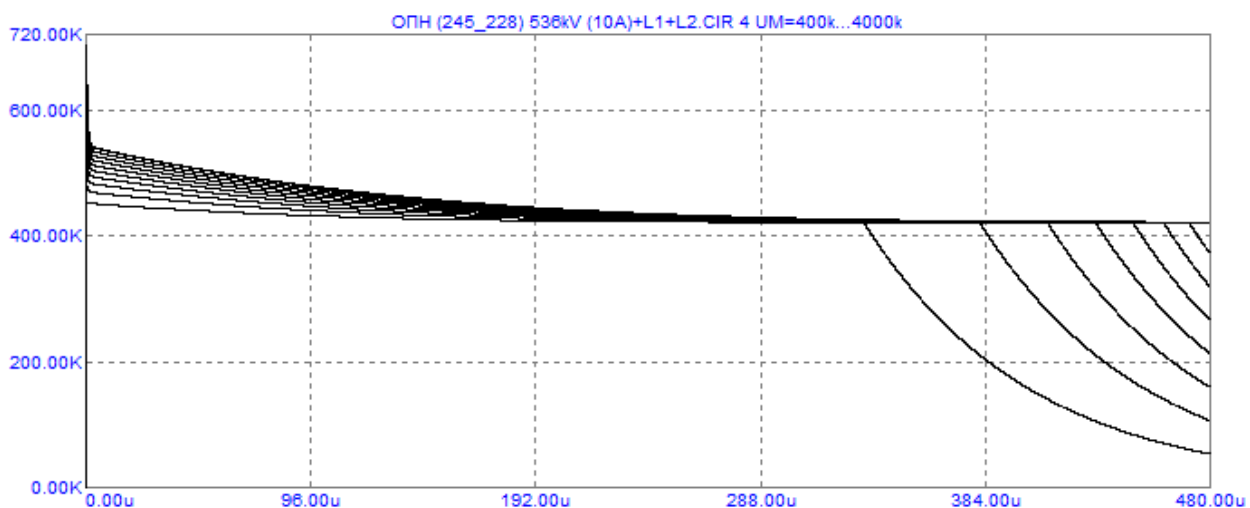


б)



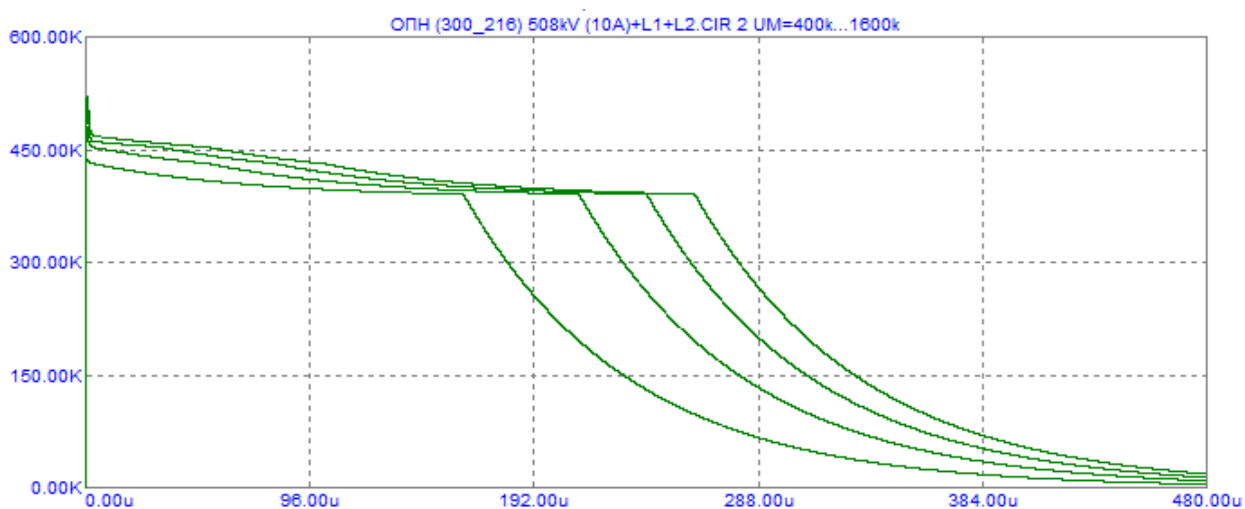
в)

Рис. 3.3.7. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-228 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



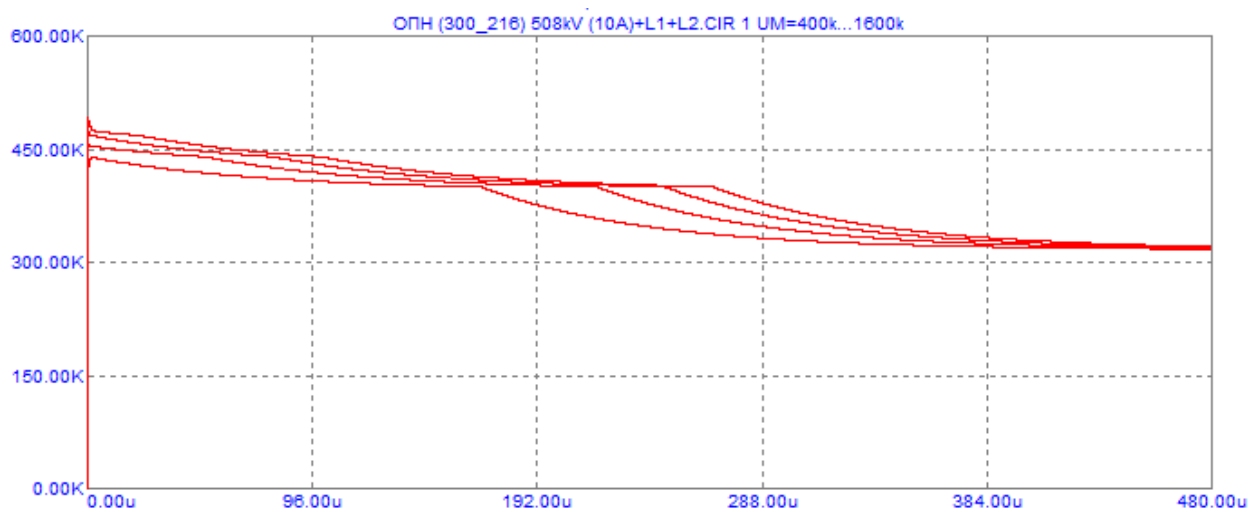
г)

Рис. 3.3.7. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 245-228 (продовження) : г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

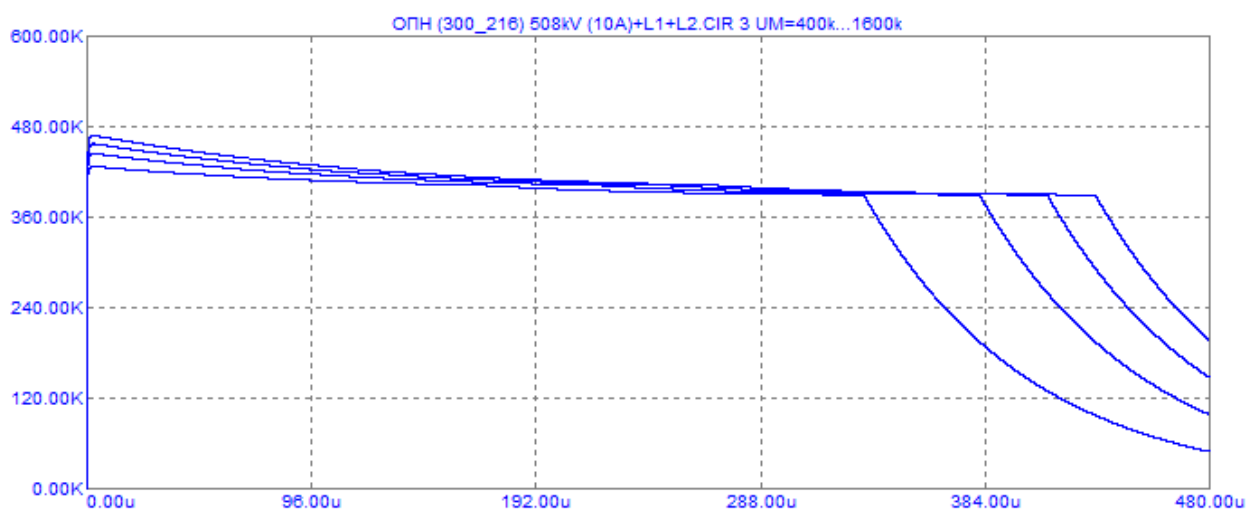


а)

Рис. 3.3.8. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-216: а) – повна модель;

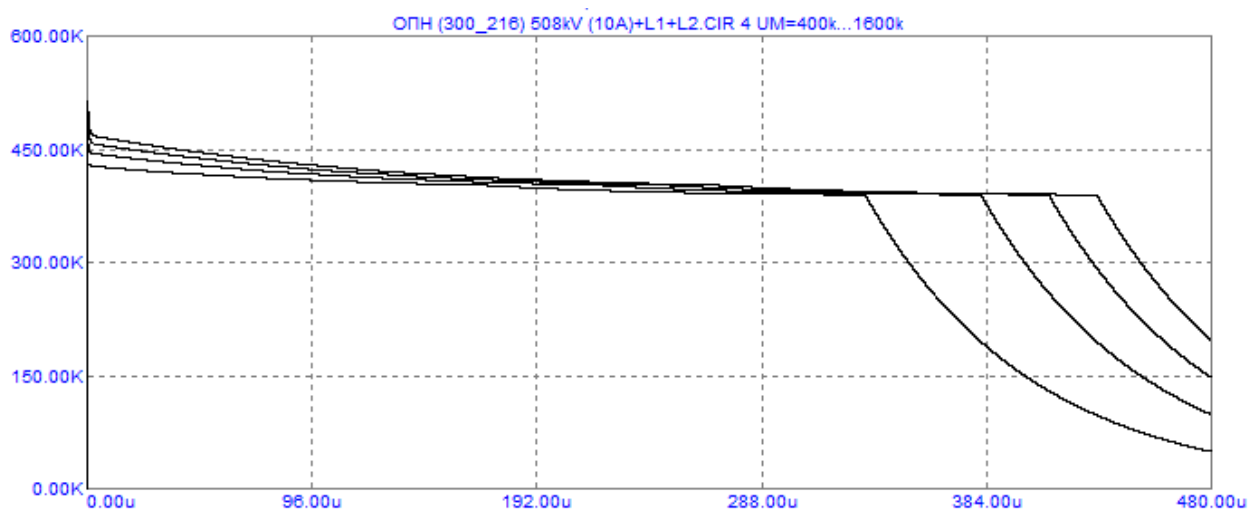


б)



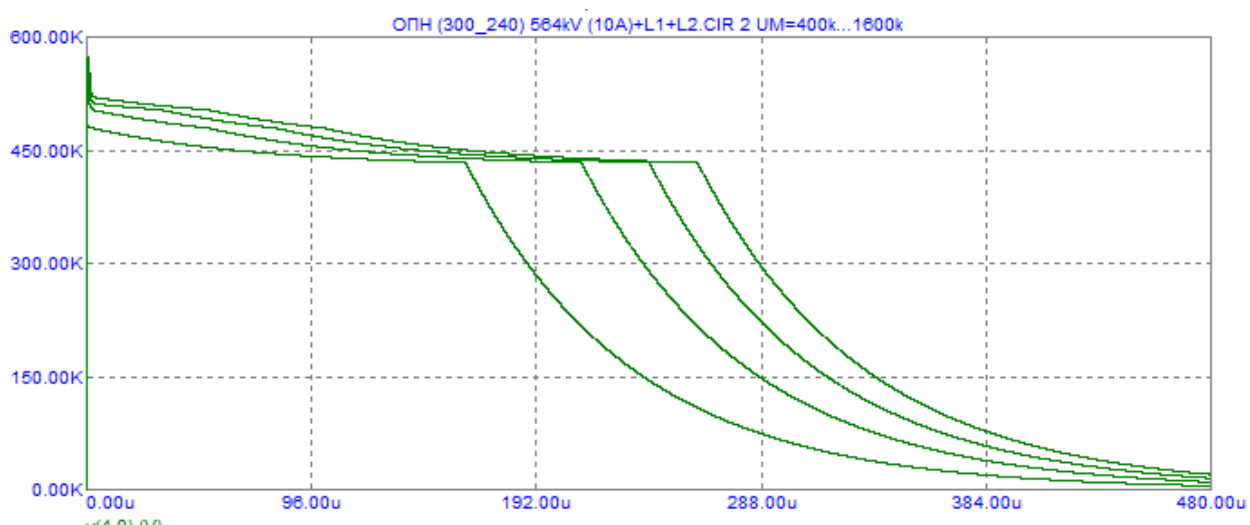
в)

Рис. 3.3.8. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-216 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



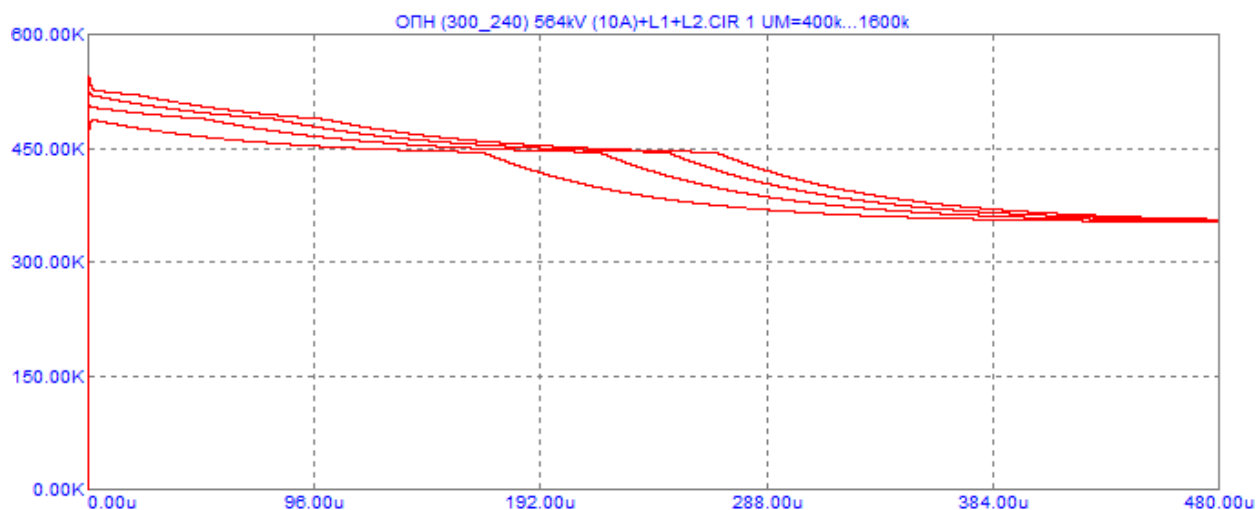
г)

Рис. 3.3.8. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-216 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

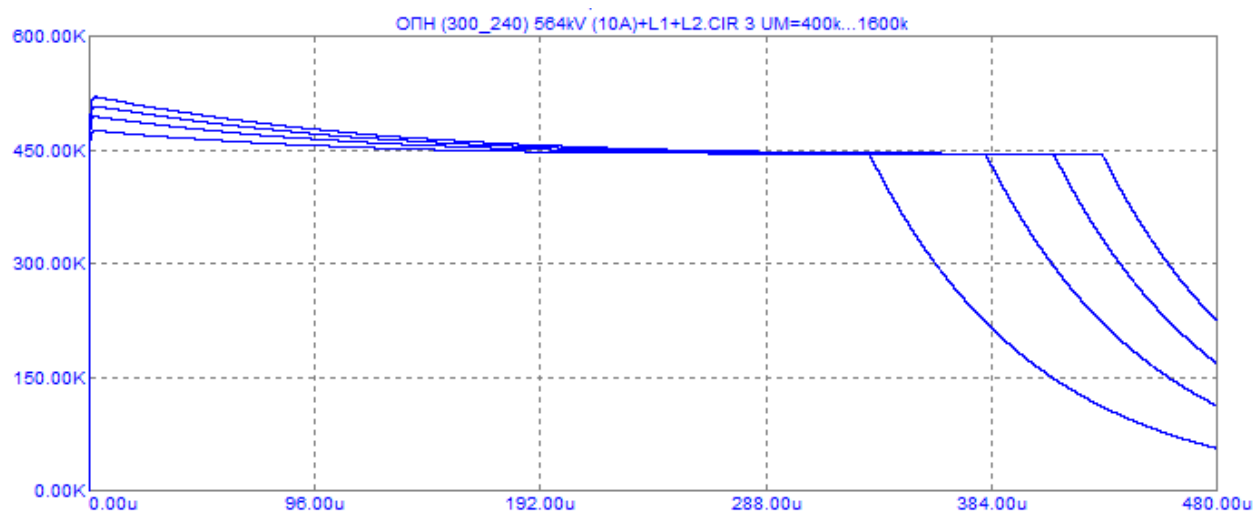


а)

Рис. 3.3.9. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-240: а) – повна модель;

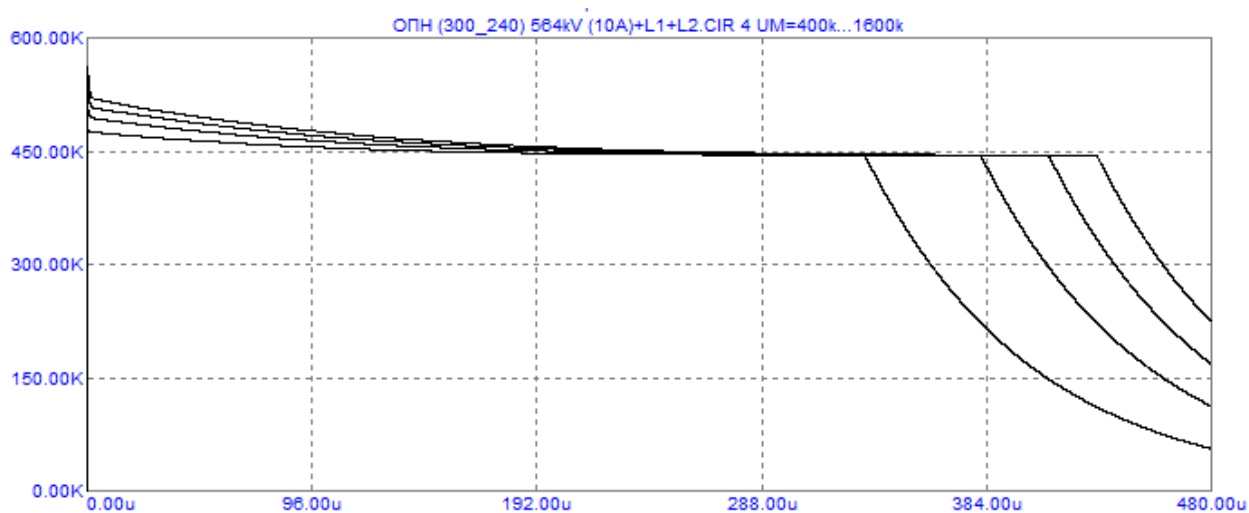


б)



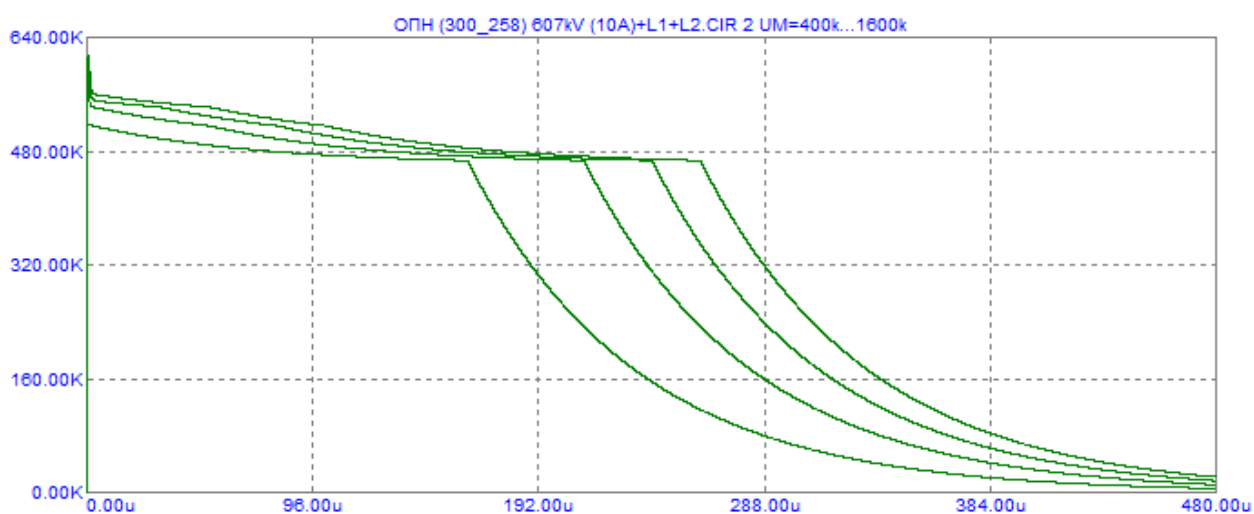
в)

Рис. 3.3.9. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-240 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



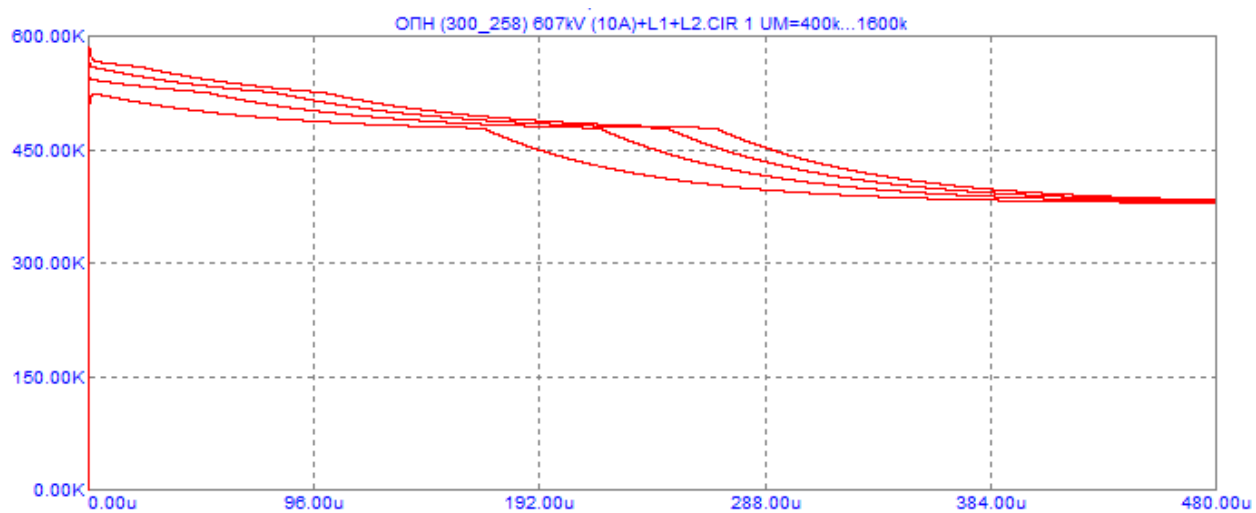
г)

Рис. 3.3.9. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-240 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

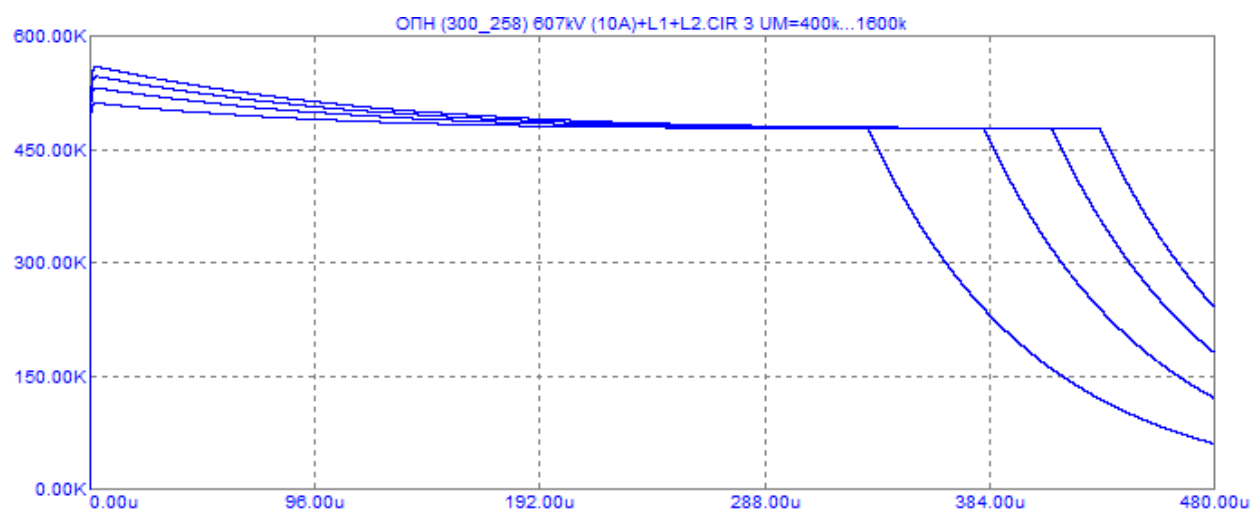


а)

Рис. 3.3.10. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-258: а) – повна модель;

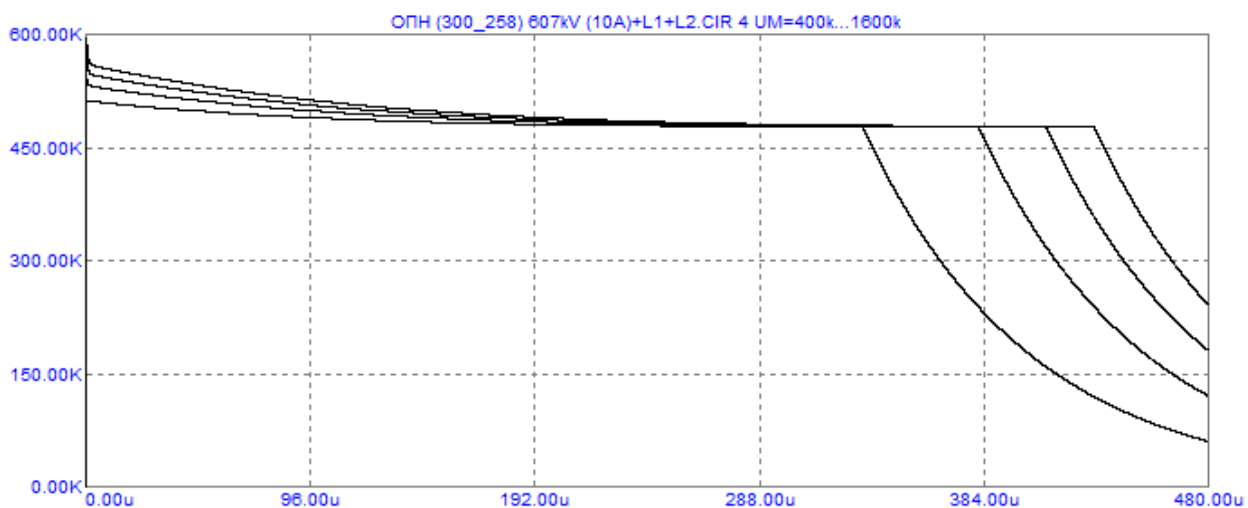


б)



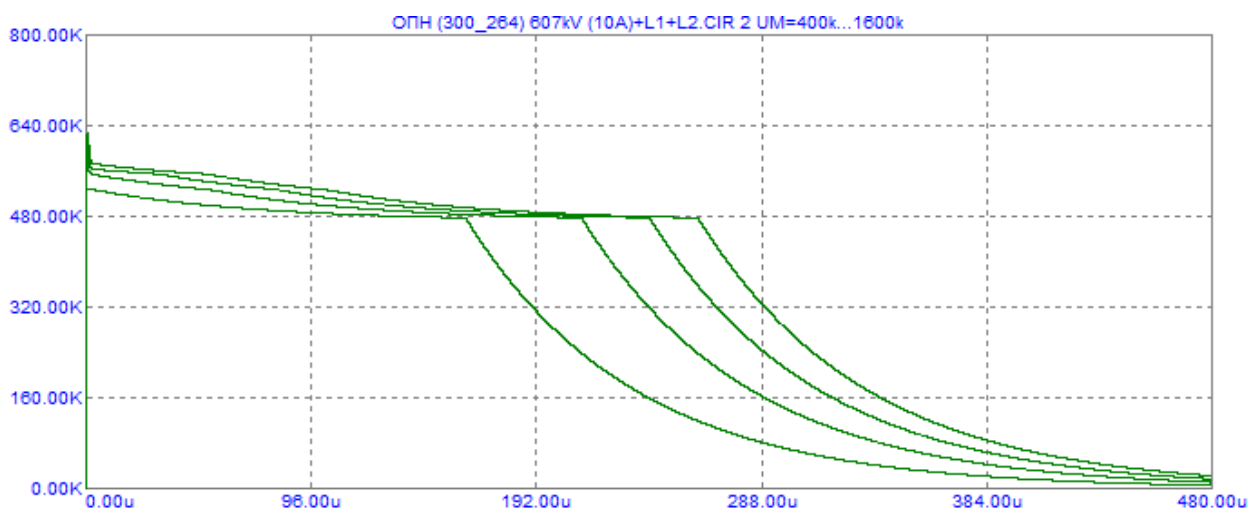
в)

Рис. 3.3.10. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-258 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



г)

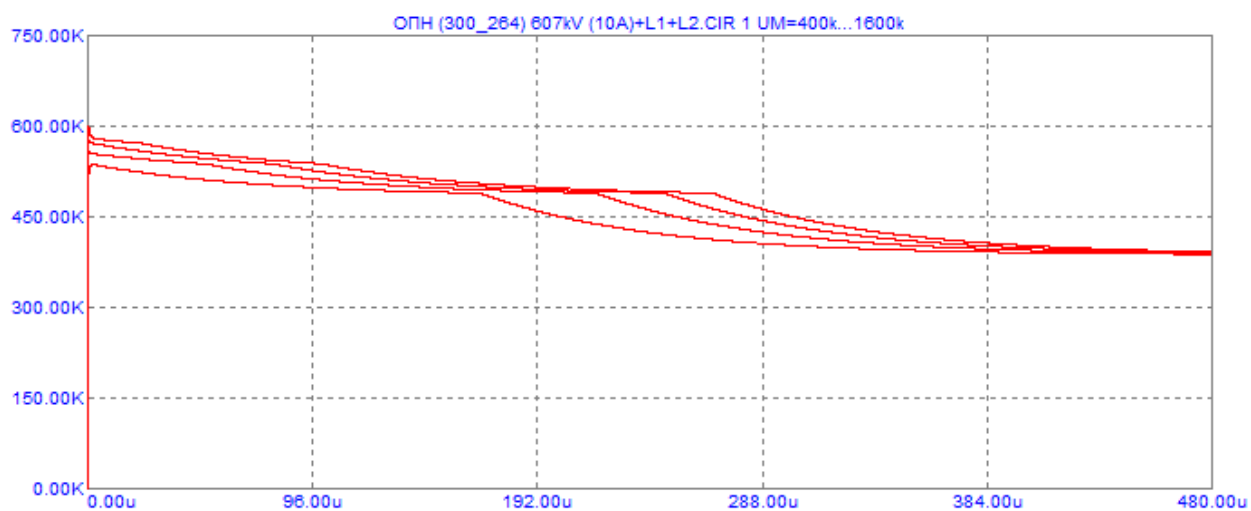
Рис. 3.3.10. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-258 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН



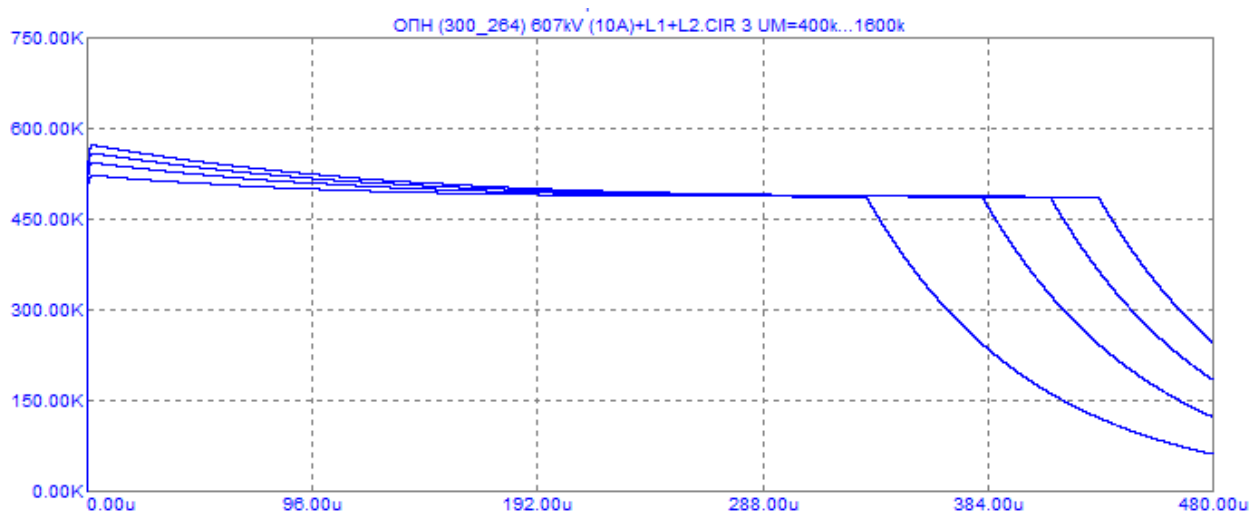
а)

Рис. 3.3.11. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-264: а) – повна модель;



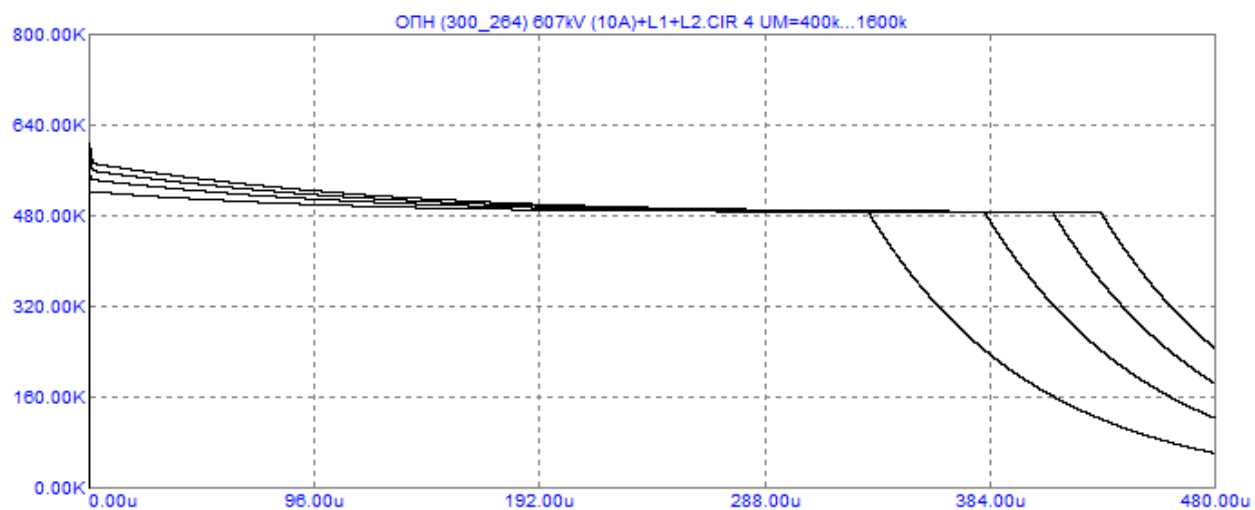


б)



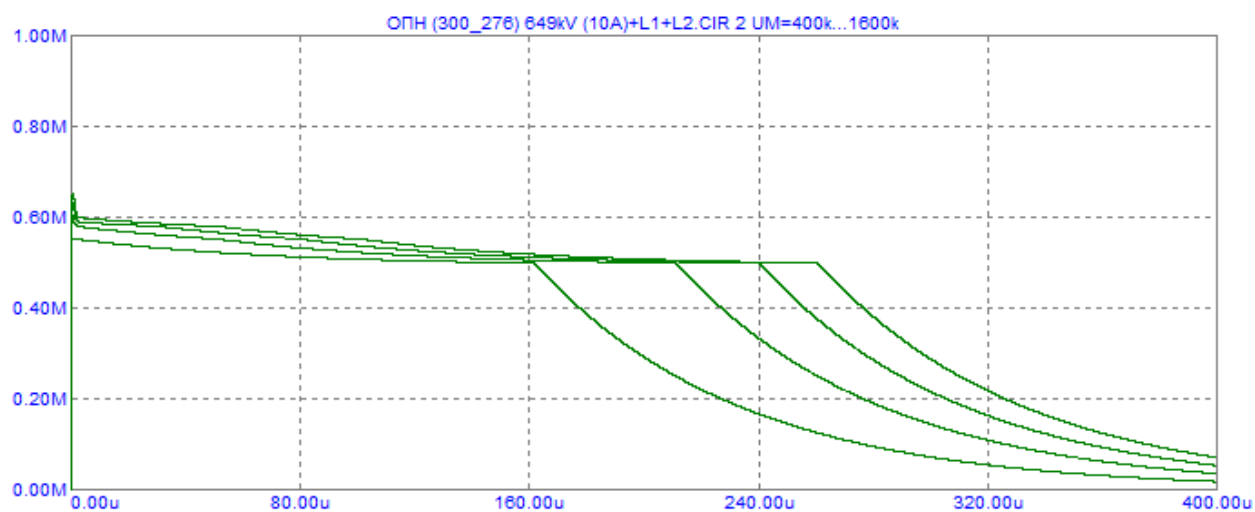
в)

Рис. 3.3.11. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-264 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



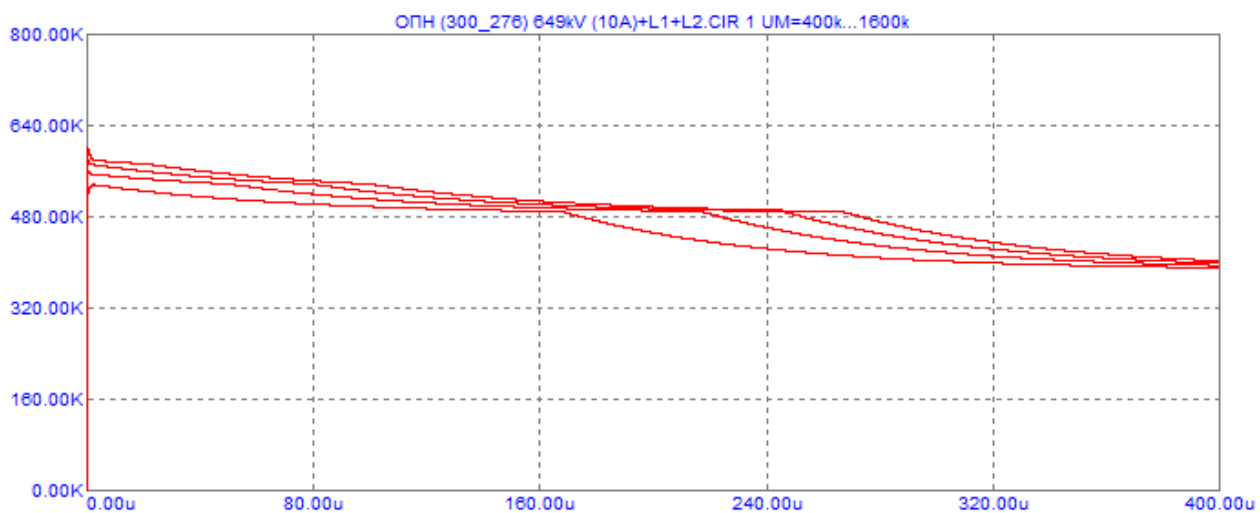
г)

Рис. 3.3.11. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-264 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

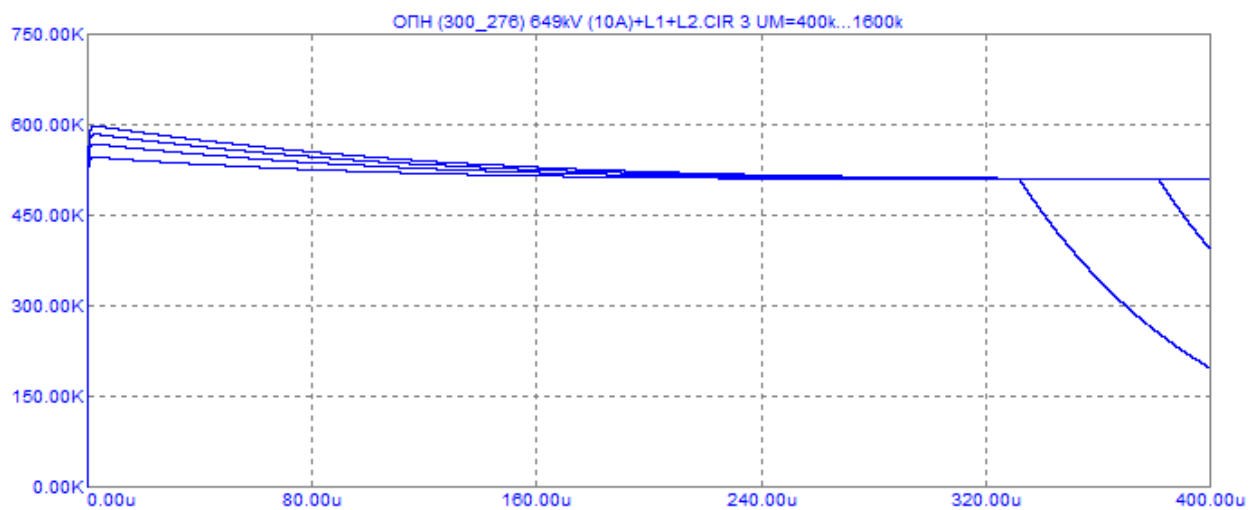


а)

Рис. 3.3.12. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-276: а) – повна модель;

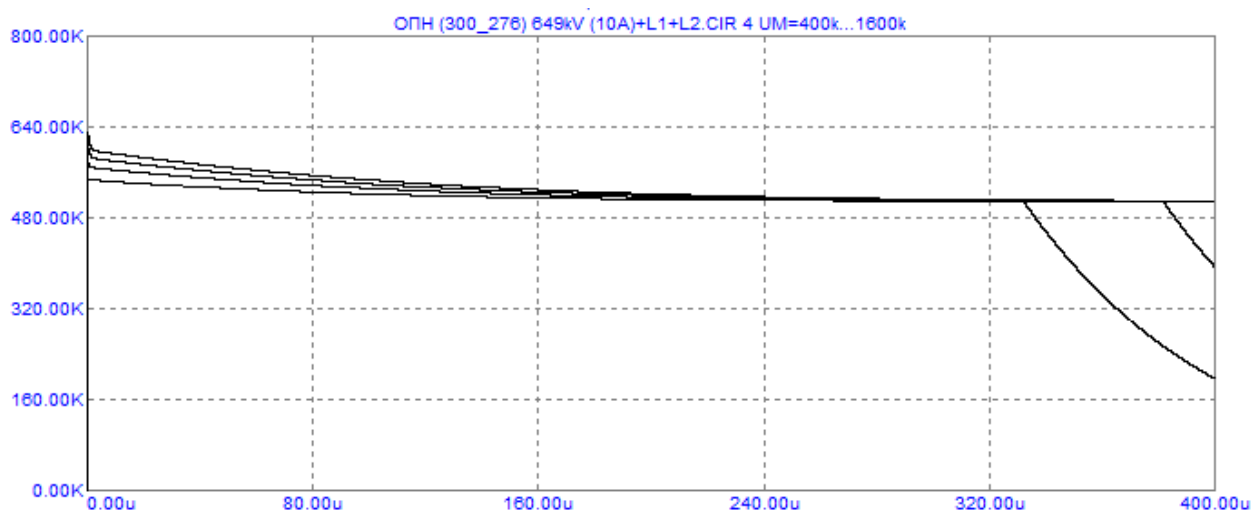


б)



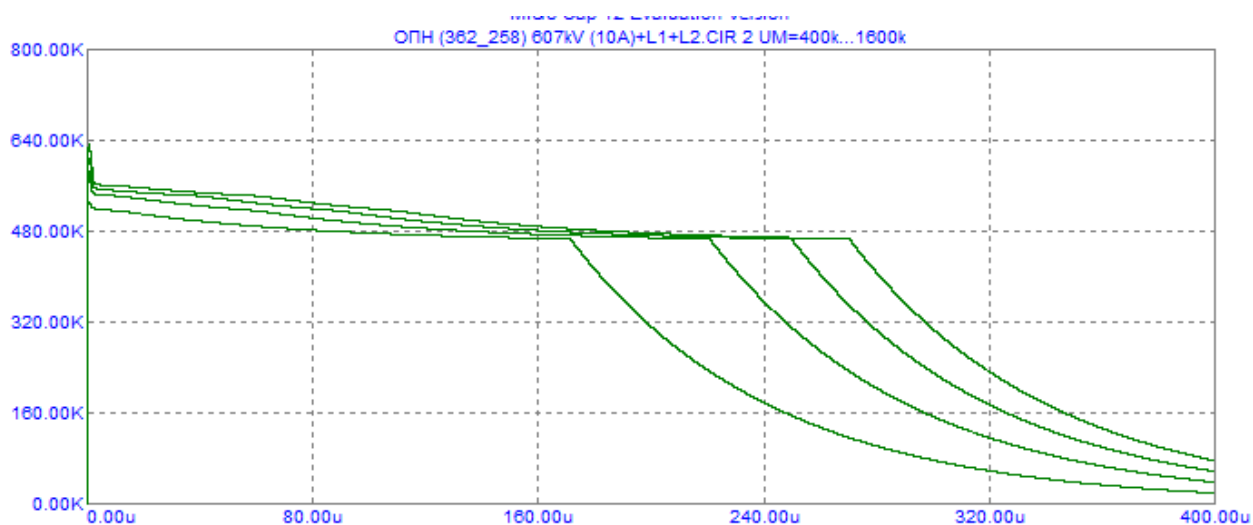
в)

Рис. 3.3.12. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-276 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



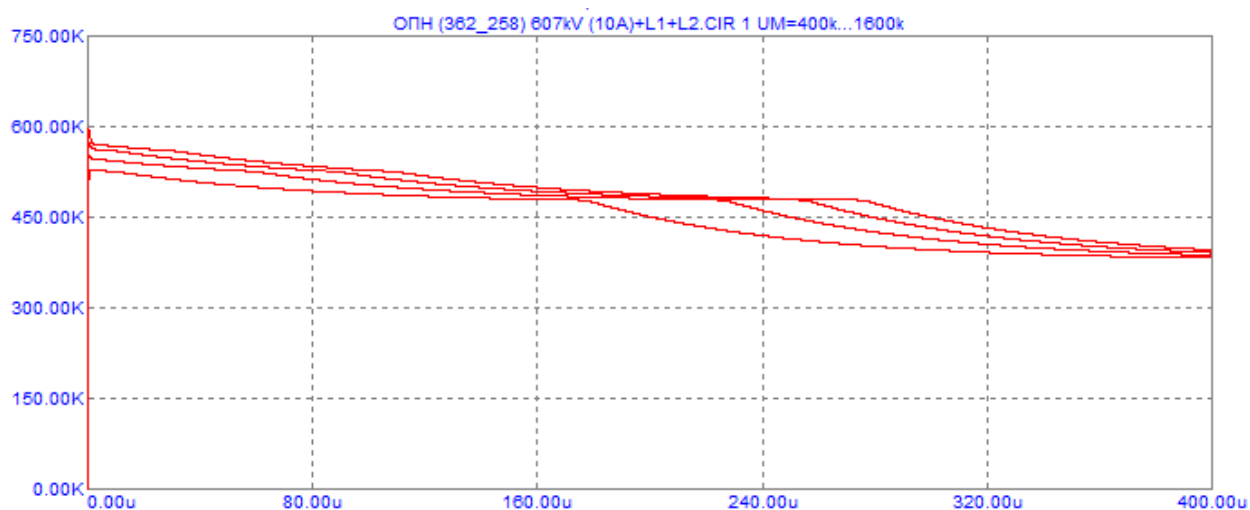
г)

Рис. 3.3.12. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 300-276 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

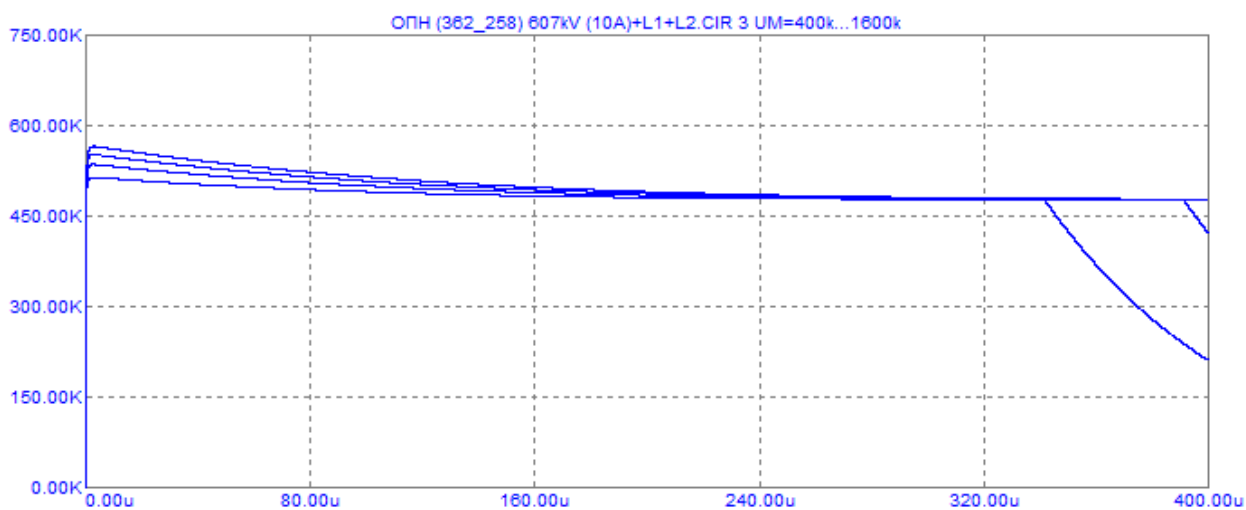


а)

Рис. 3.3.13. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-258: а) – повна модель;

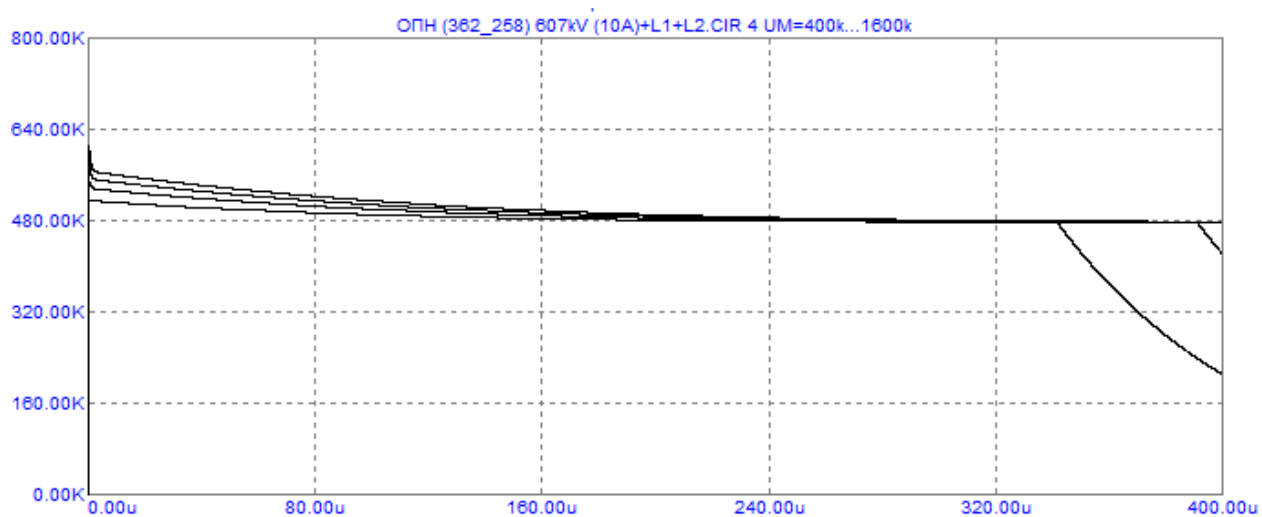


б)



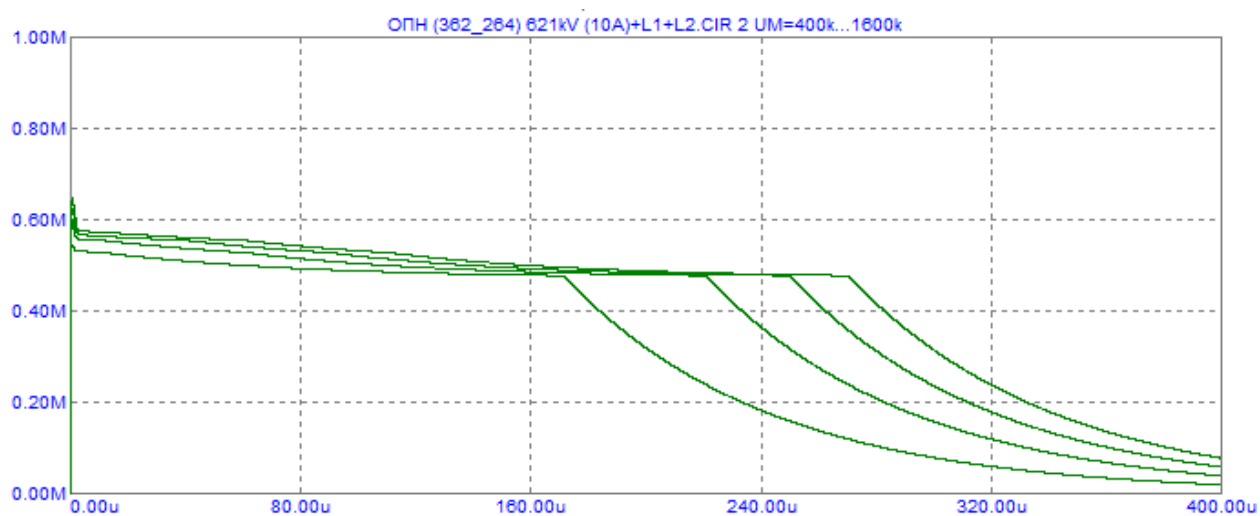
в)

Рис. 3.3.13. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-258 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



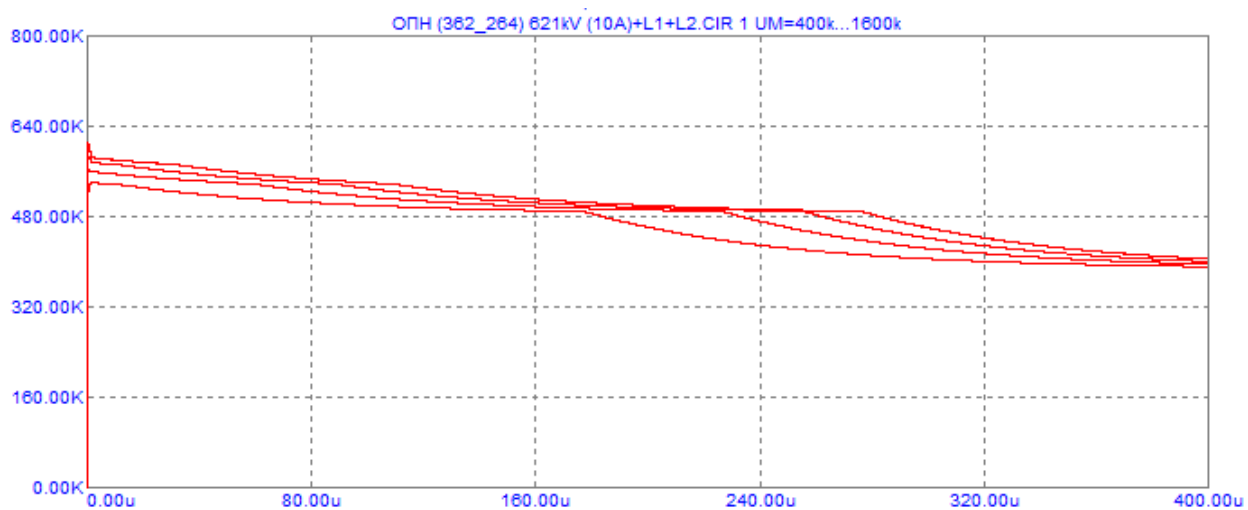
г)

Рис. 3.3.13. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-258 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

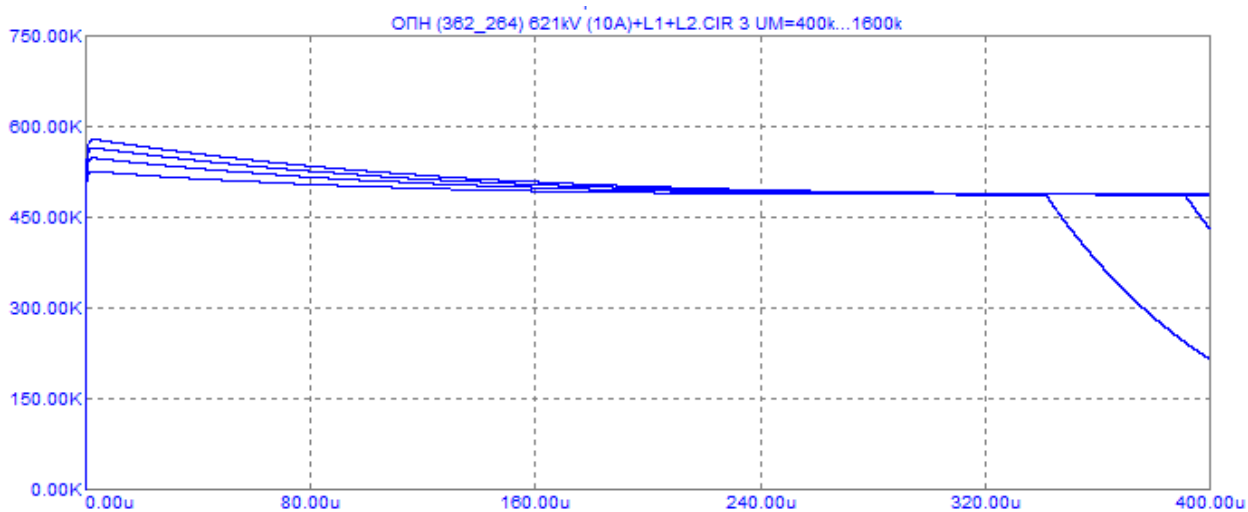


а)

Рис. 3.3.14. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-264: а) – повна модель;

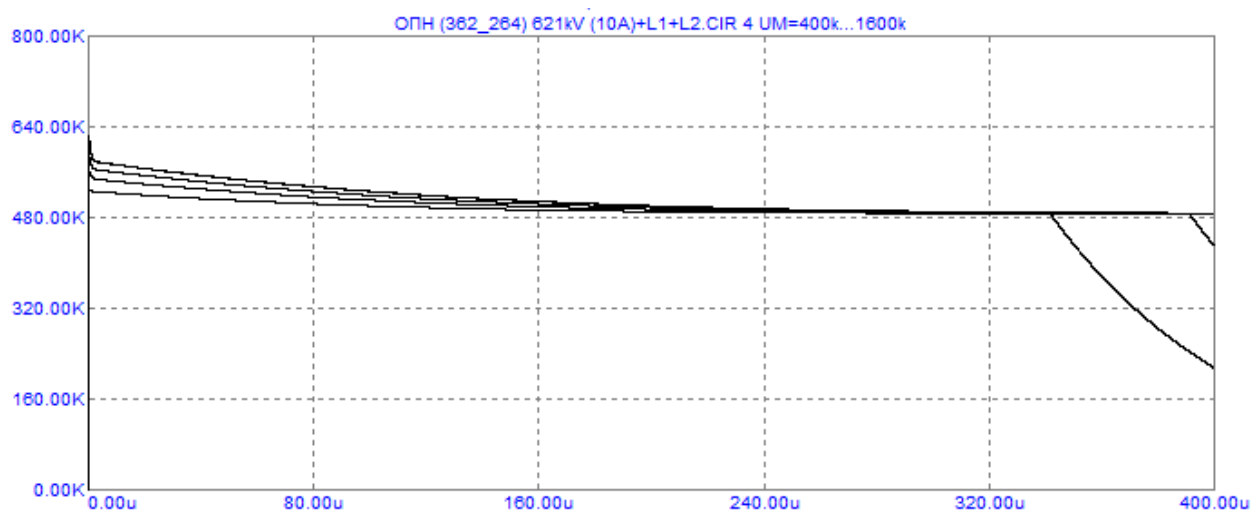


б)



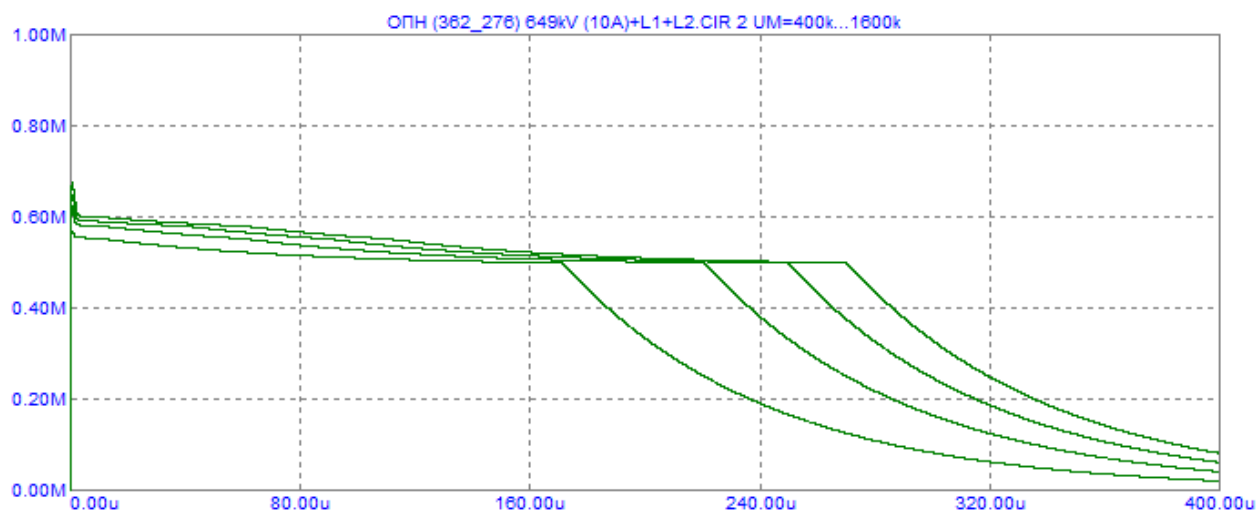
в)

Рис. 3.3.14. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-264 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



г)

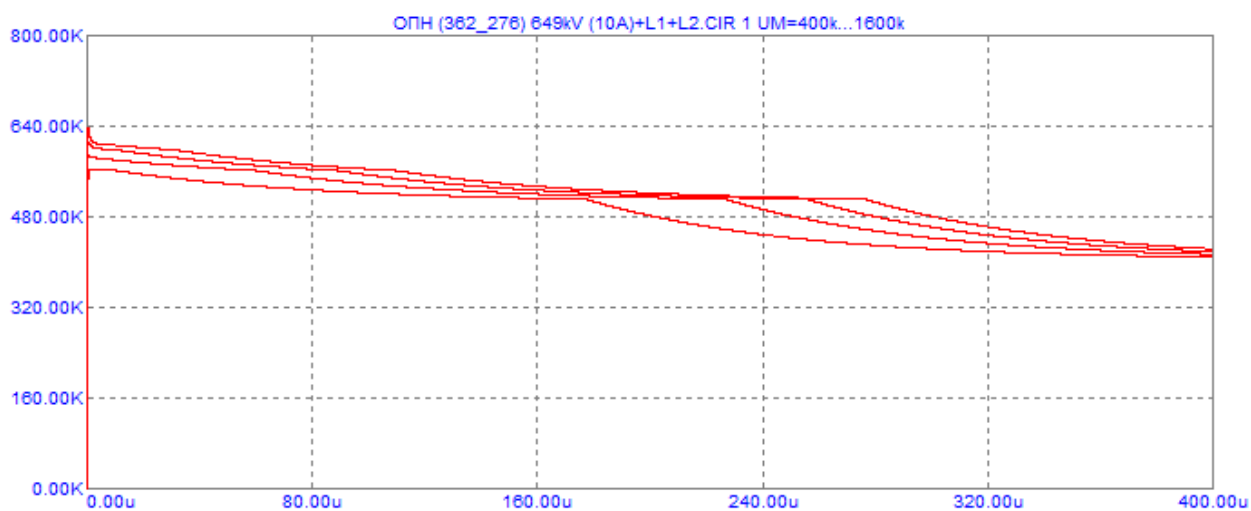
Рис. 3.3.14. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-264 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН



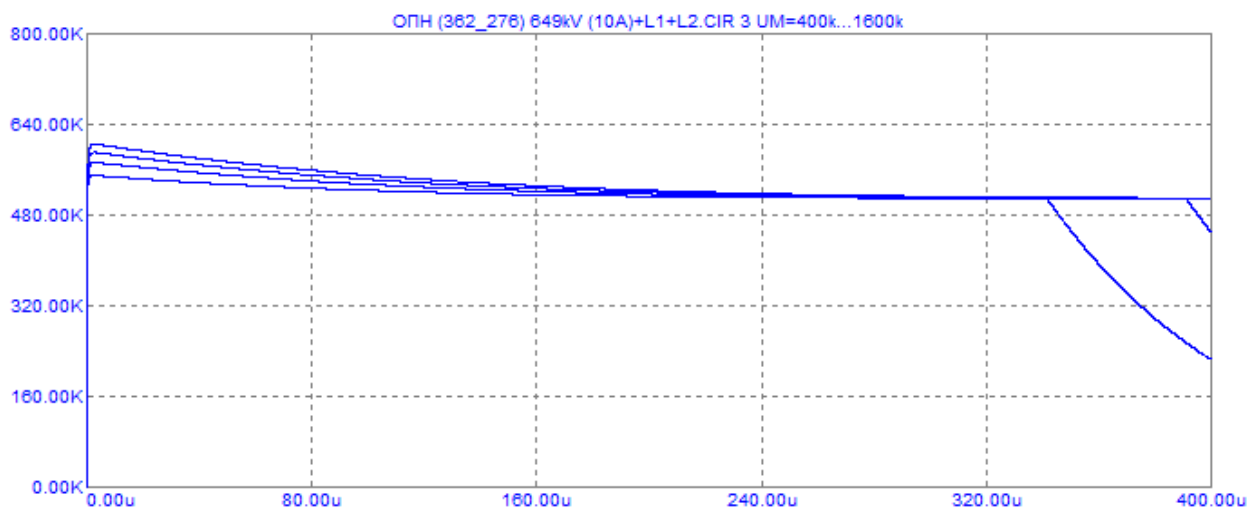
а)

Рис. 3.3.15. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-276: а) – повна модель;



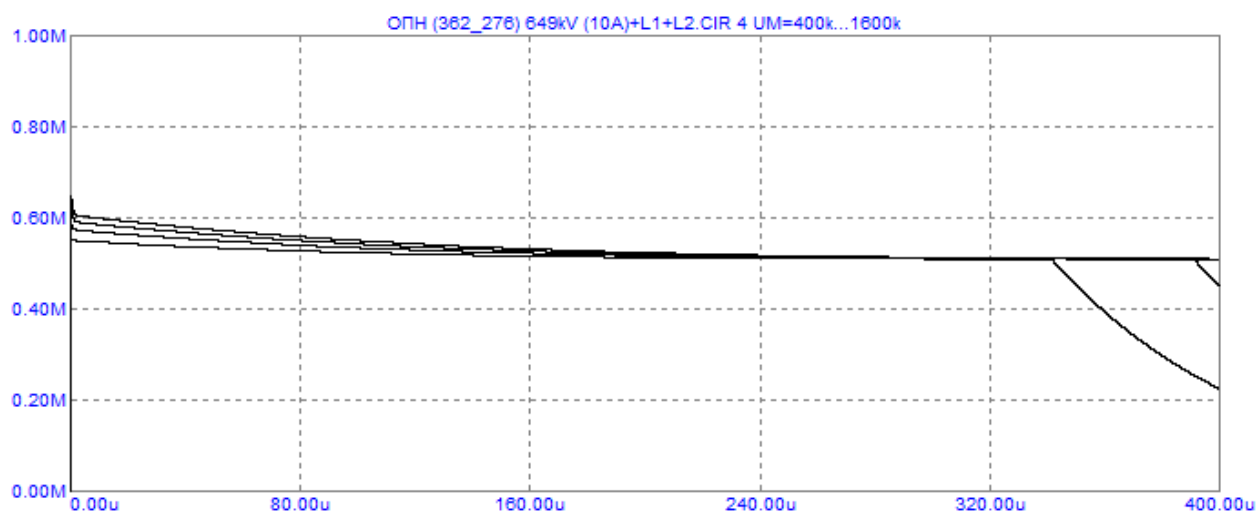


б)



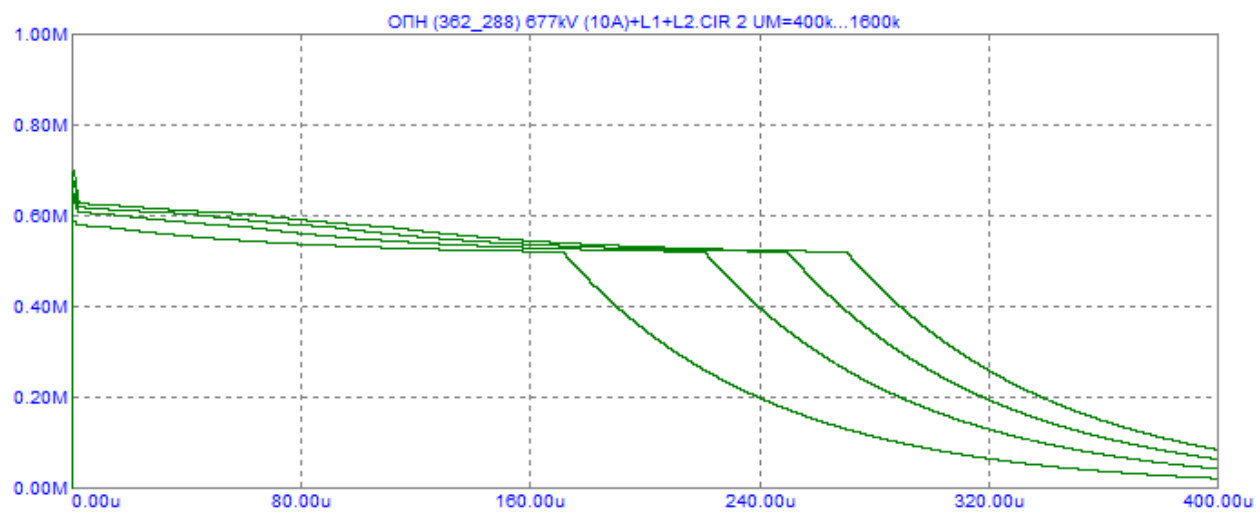
в)

Рис. 3.3.15. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-276 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



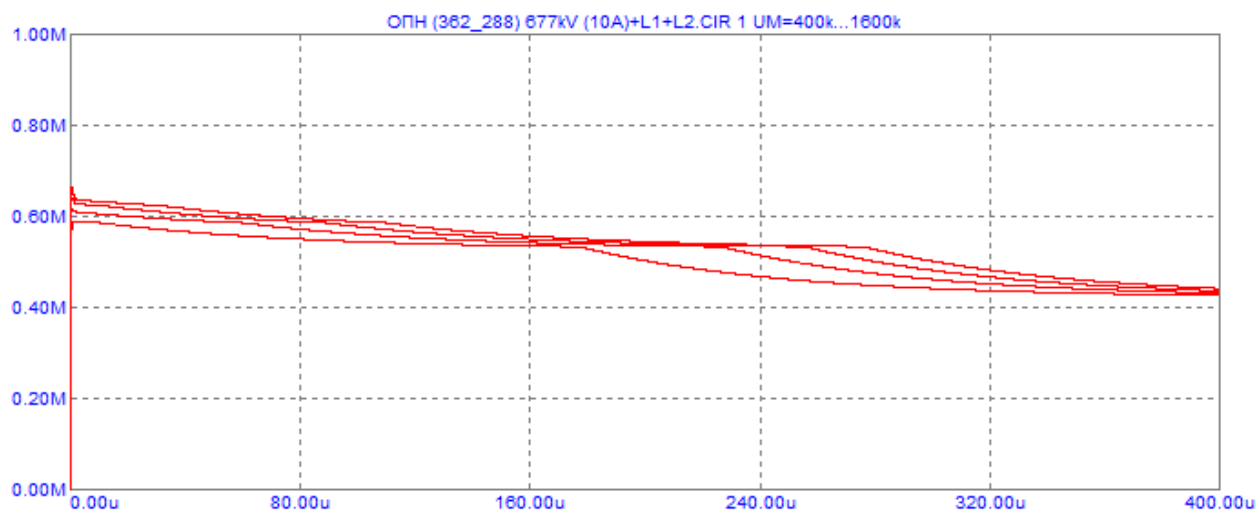
г)

Рис. 3.3.15. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-276 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

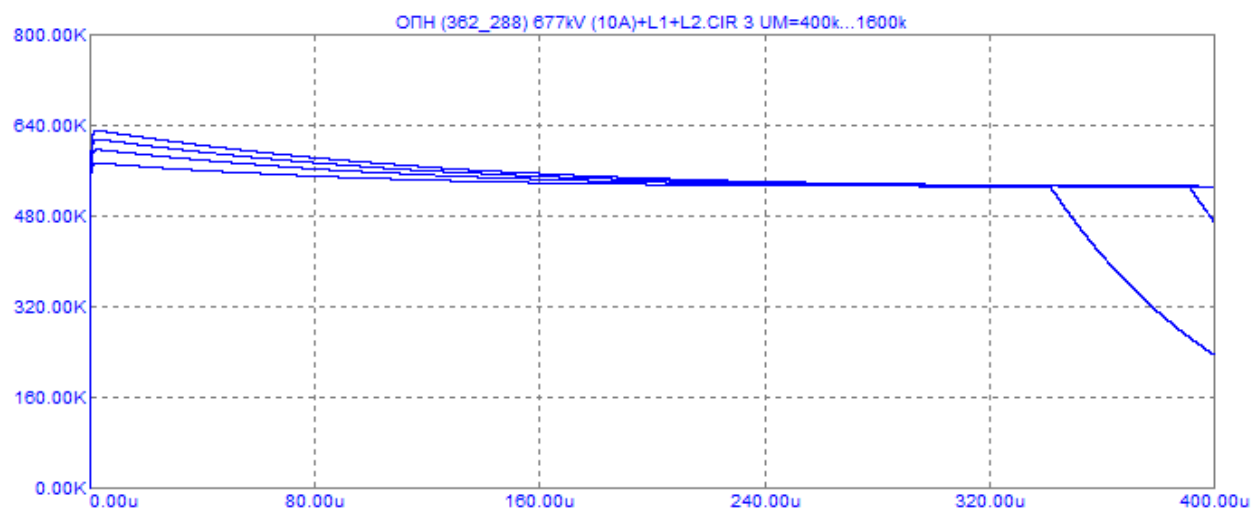


а)

Рис. 3.3.16. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-288: а) – повна модель;

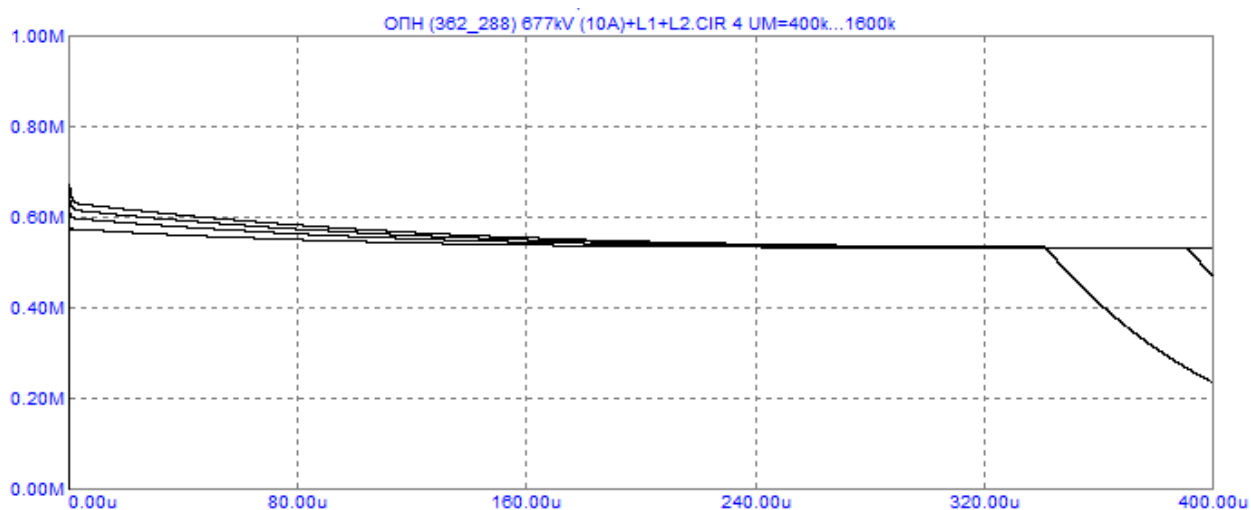


б)



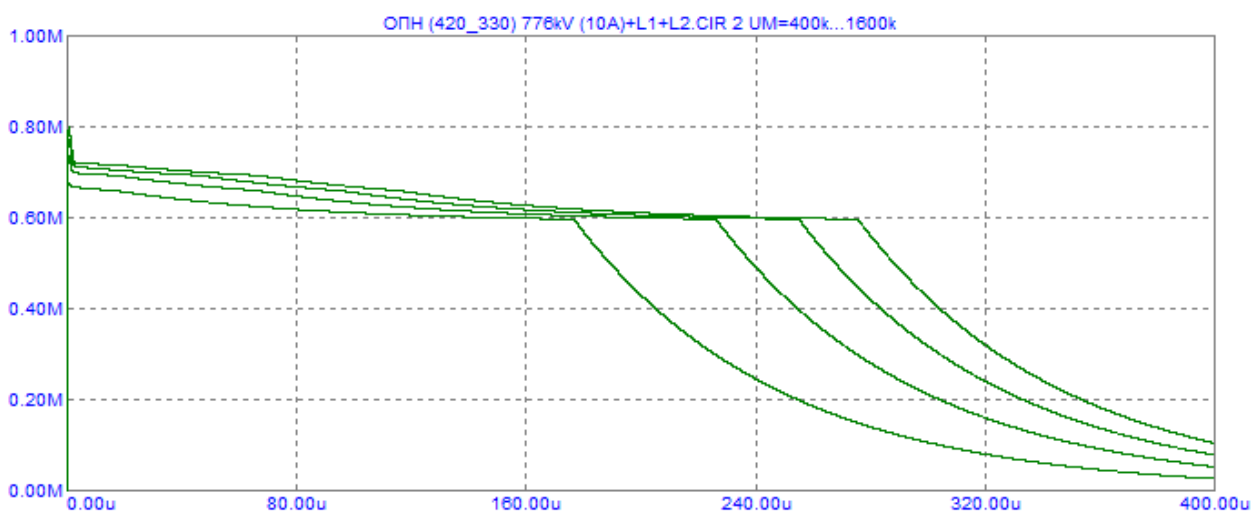
в)

Рис. 3.3.16. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-288 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



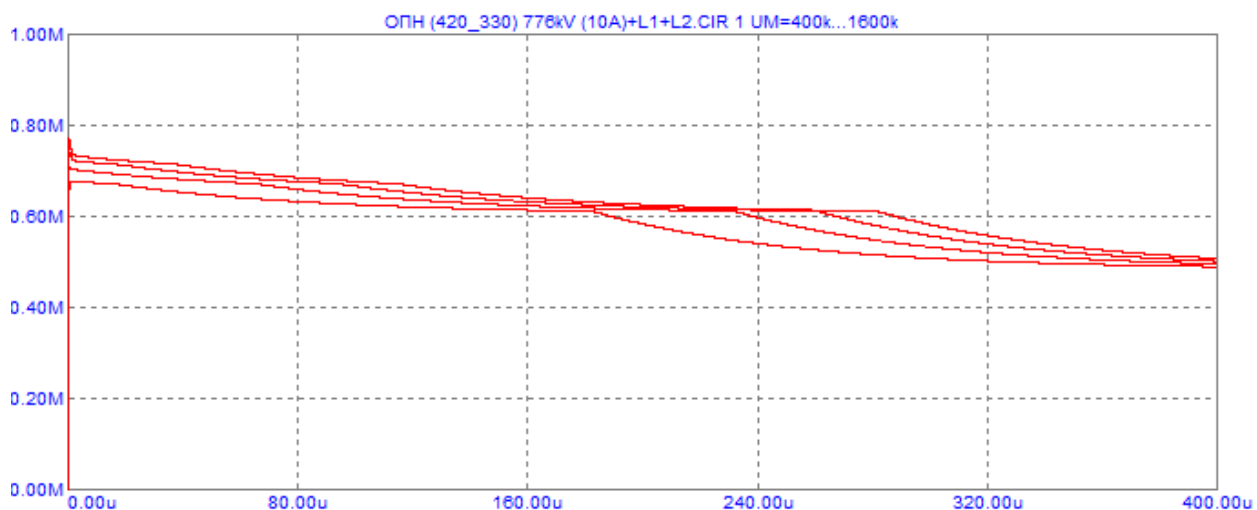
г)

Рис. 3.3.16. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 362-288 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

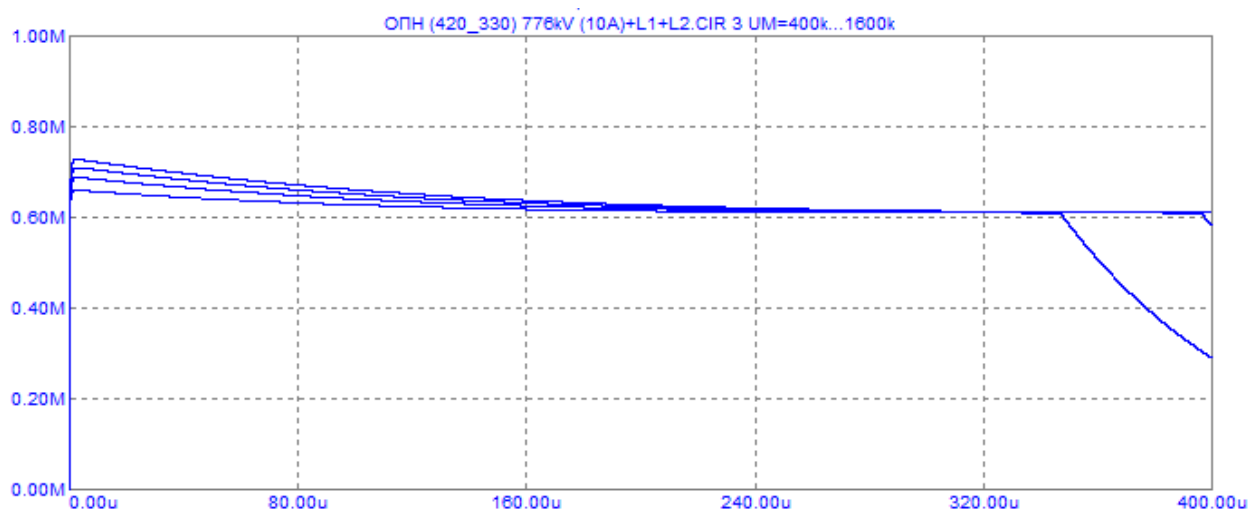


а)

Рис. 3.3.17. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-330: а) – повна модель;

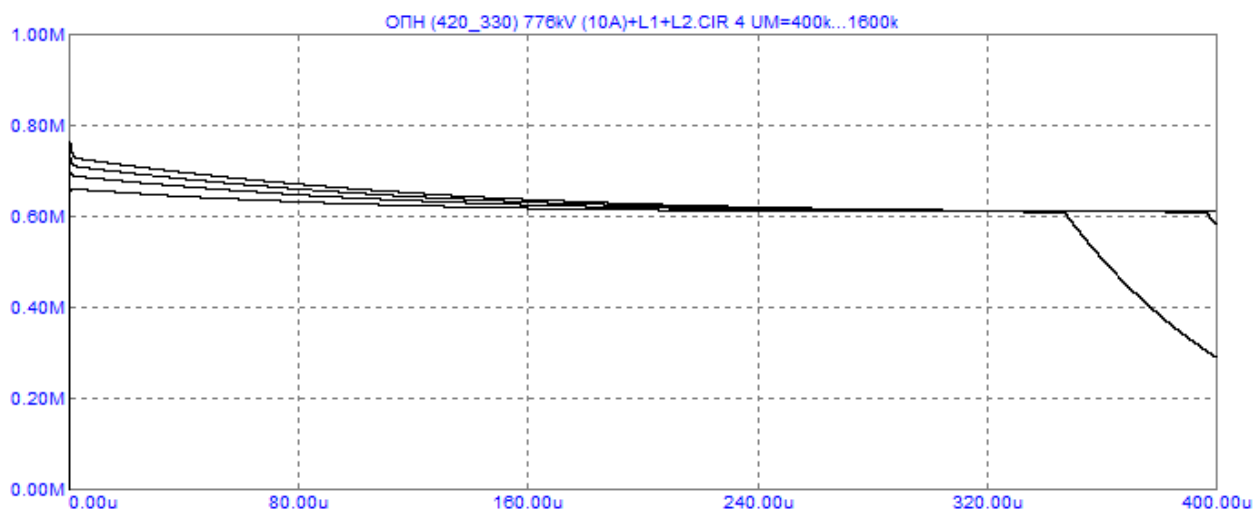


б)



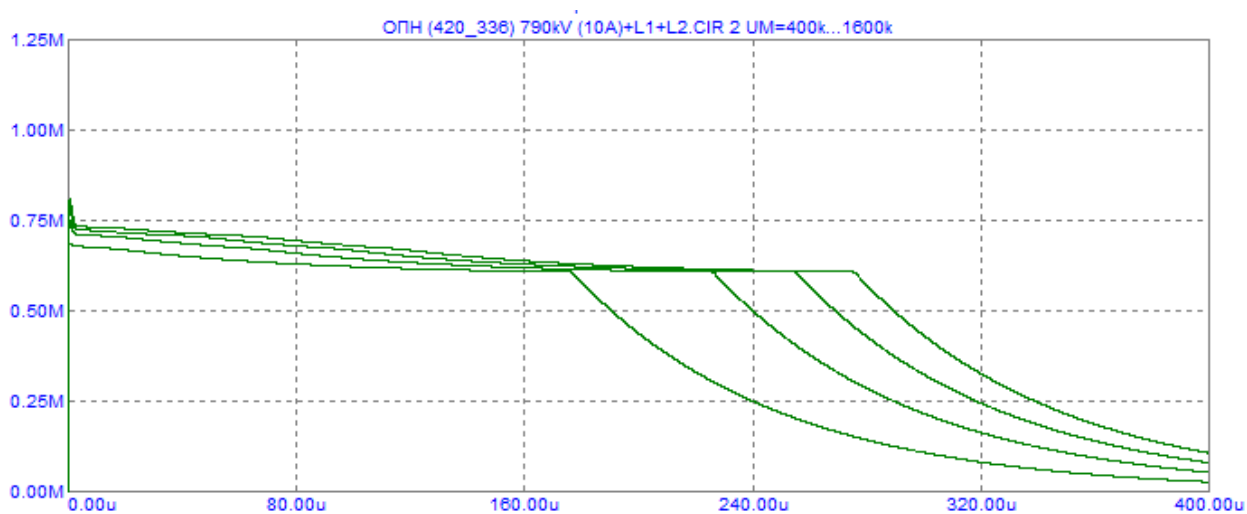
в)

Рис. 3.3.17. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-330: б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



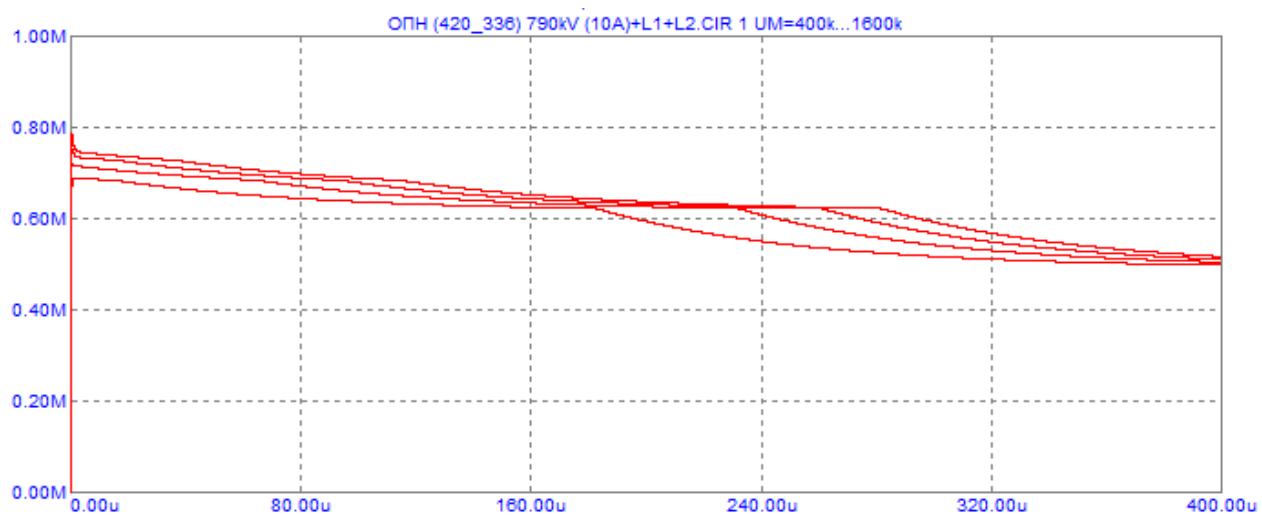
г)

Рис. 3.3.17. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-330 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

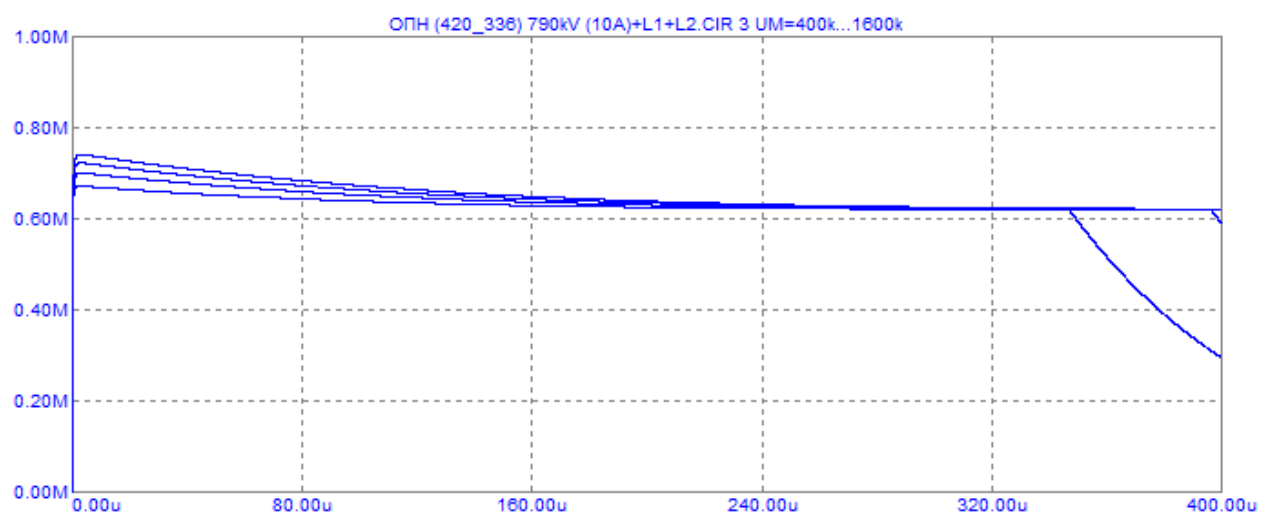


а)

Рис. 3.3.18. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-336: а) – повна модель;

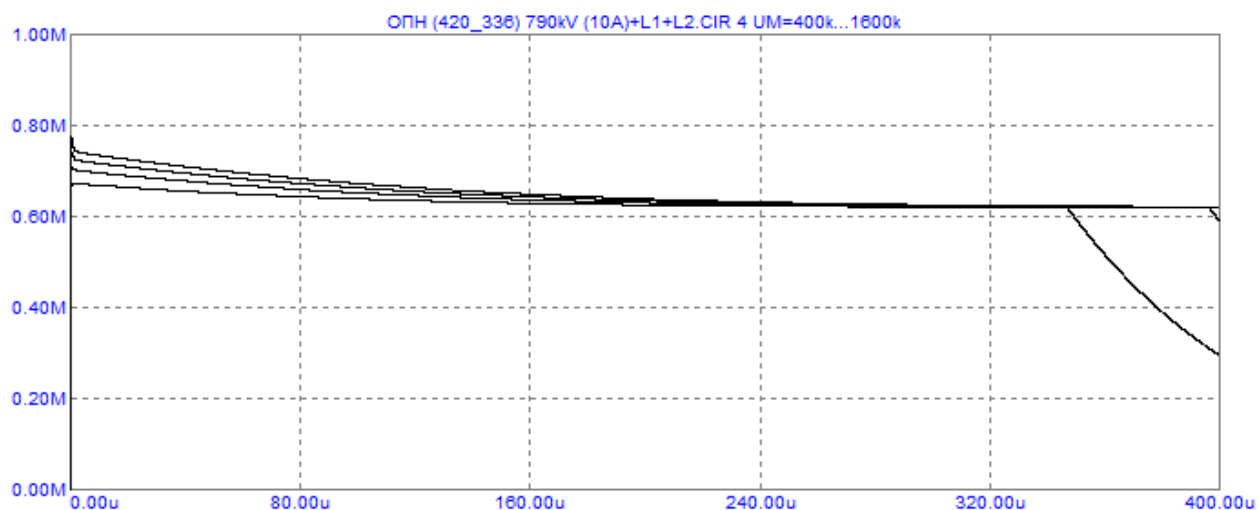


б)



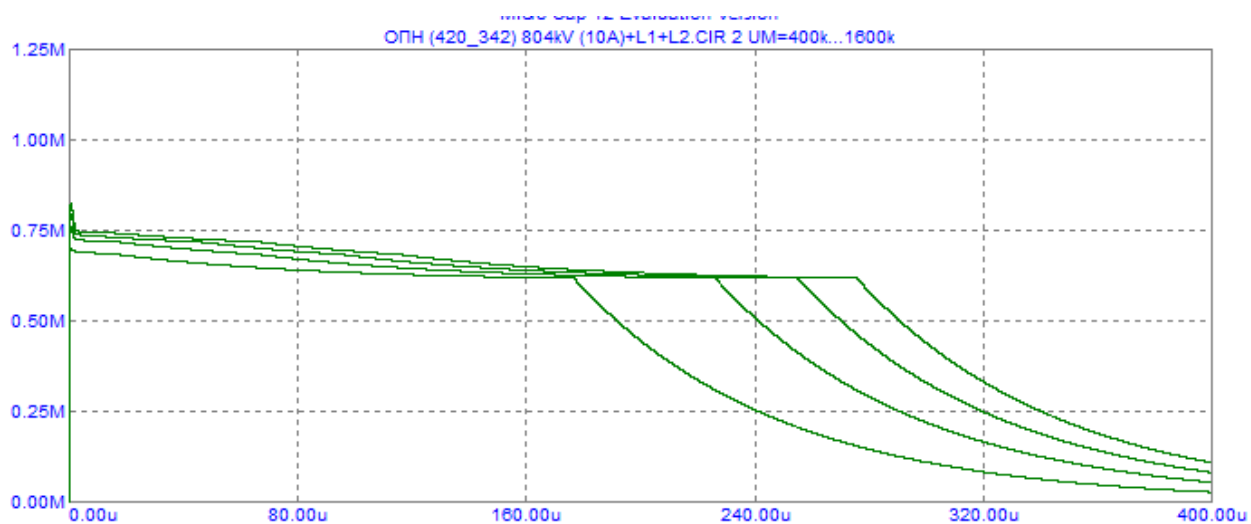
в)

Рис. 3.3.18. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-336 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



г)

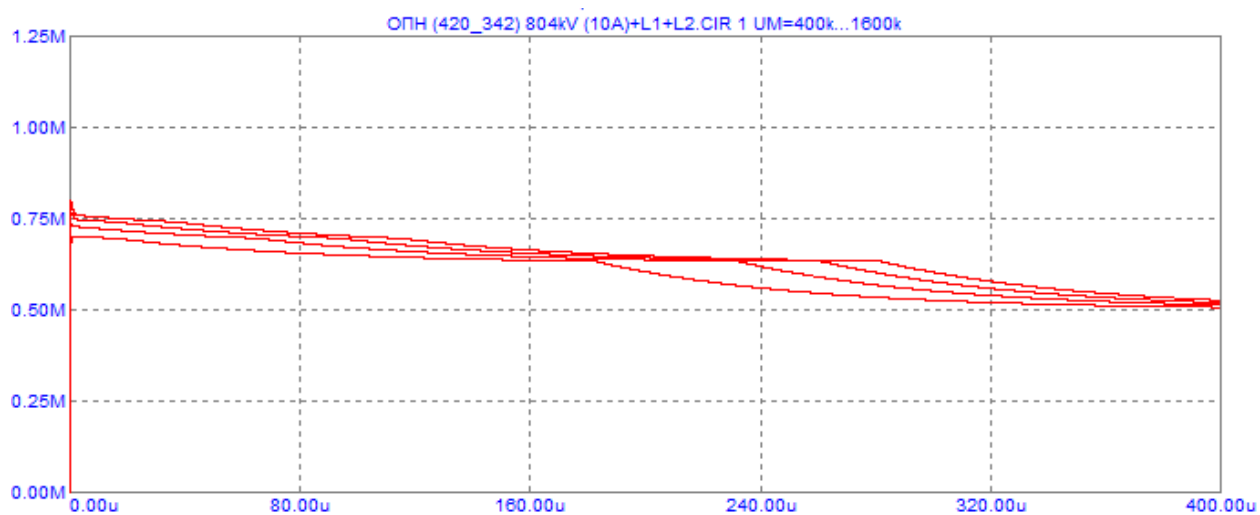
Рис. 3.3.18. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-336 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН



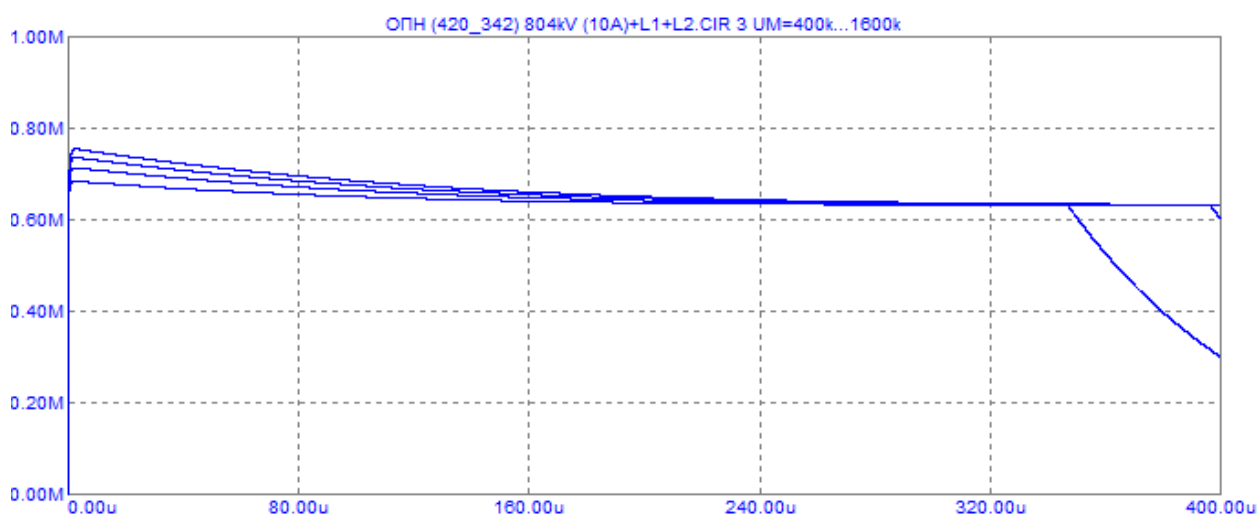
а)

Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-342: а) – повна модель;





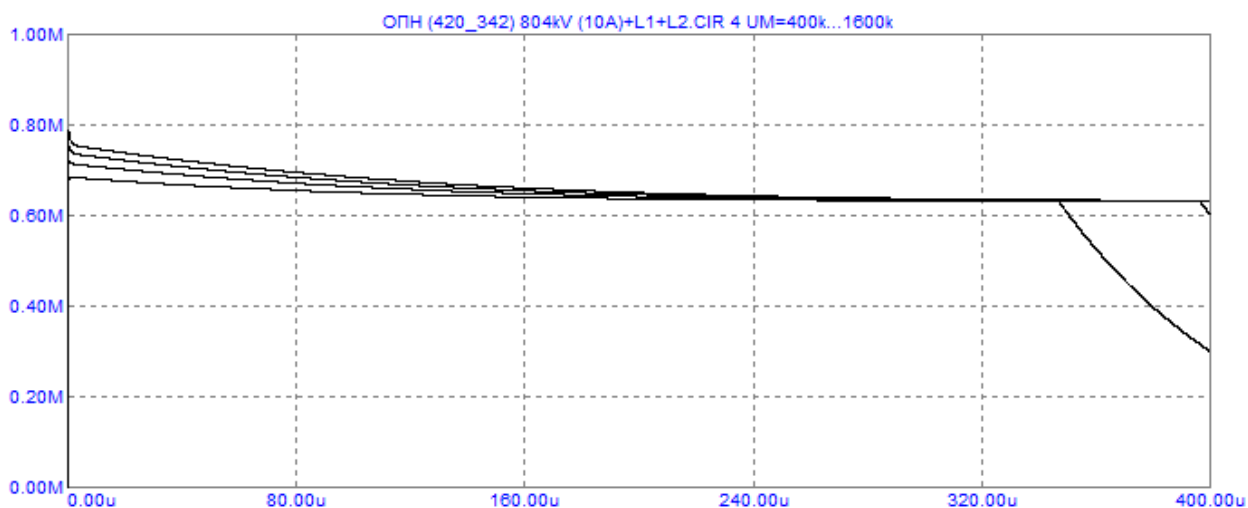
б)



в)

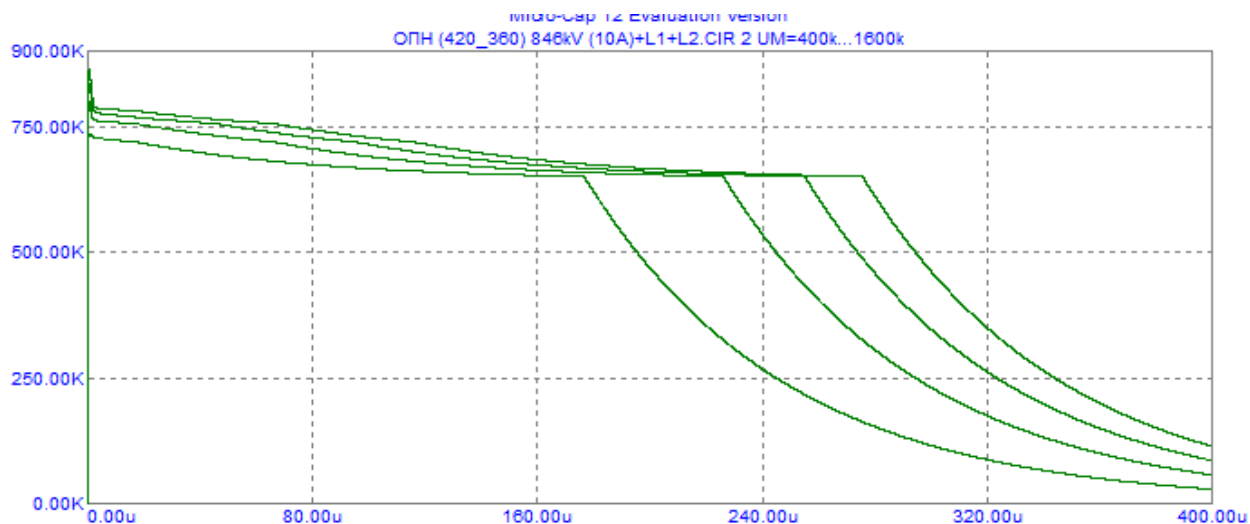
Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-342 (продовження): б) – спрощена модель;

в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



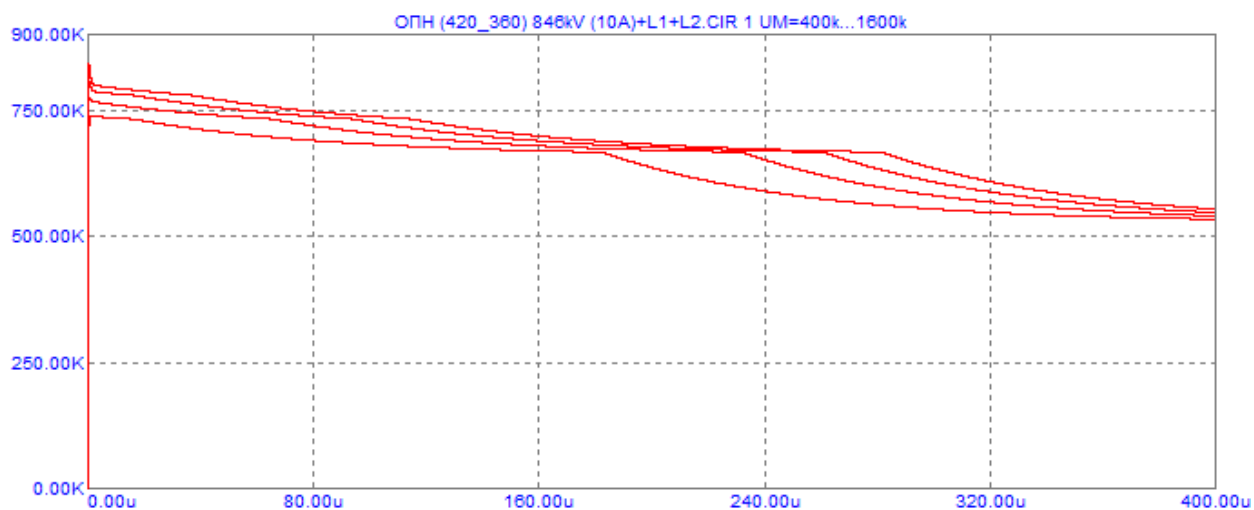
г)

Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-336 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

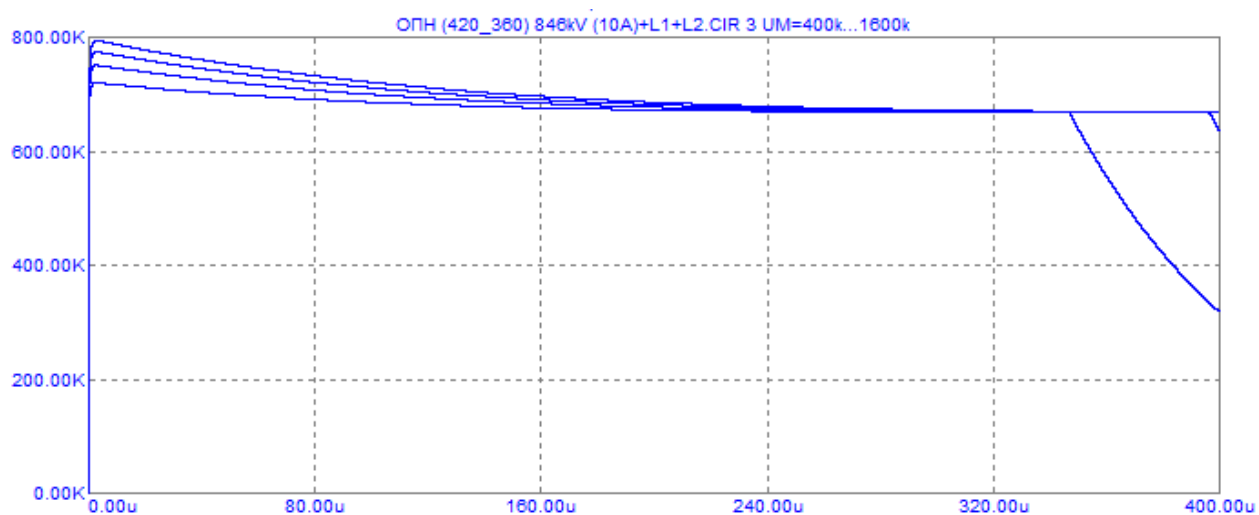


а)

Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-360: а) – повна модель;

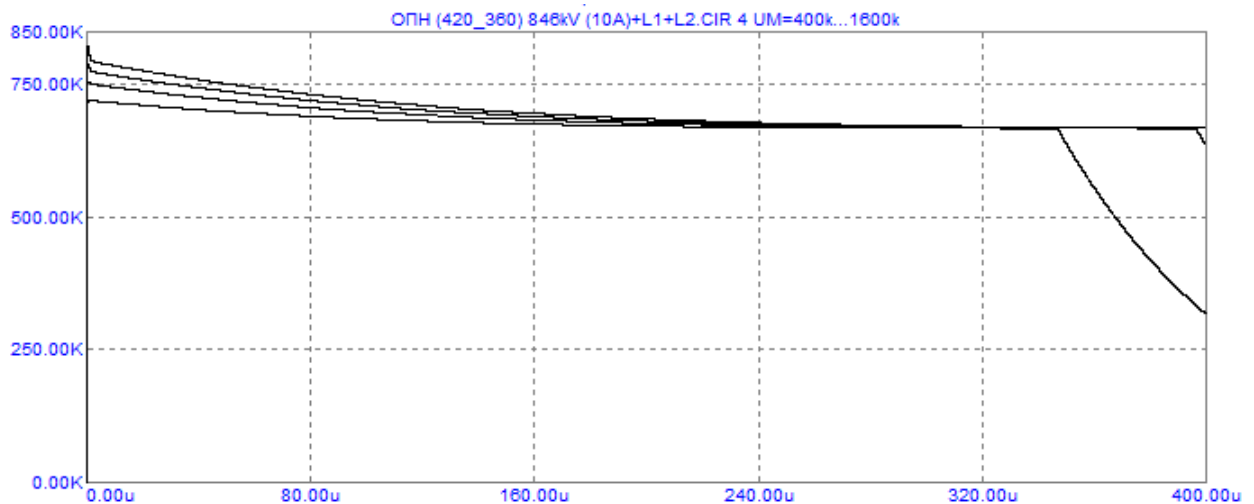


б)



в)

Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-360 (продовження): б) – спрощена модель; в)- модель запропонована на кафедрі ТЕВН



г)

Рис. 3.3.19. Сукупність кривих, що показують падіння напруги між виводами в ОПН PERLIM Q 420-360 (продовження): г)- удосконалена модель запропонована на кафедрі ТЕВН

### 3.4. Дослідження ефективності двох обмежувачі перенапруг нелінійних, установлених паралельно.

Відповідно за [16] було досліджено характеристики розрядів блискавки на розподільчих лініях електромережі на основі аналізу 20 – місць розташованих у гірських районах, що стоять перед Японським морем. Основною метою досліджень була оцінка паралельно роботи ОПН. Близько 50% захисних апаратів були пошкоджені, що розташовані у гірських районах. При встановленні двох різних ОПН номіналом 2,5 кА та 10 кА на паралельну роботу, останні не спрацьовують. Також, паралельне встановлення обмежувачів перенапруг ефективніше поглинає енергію перенапруг, якщо встановлені ОПН мають однакові параметри [16].

В даній роботі буде проведено порівняння роботи паралельно встановлених обмежувачів перенапруг нелінійних із ОПН, які встановлені по одинці для мереж 24 - 420 кВ. Для моделювання буде використано дві схемотехнічні моделі: спрощена модель 2004 року та модель запропонована

на кафедрі ТЕВН. Для випробування взято ОПН серії PERLIM Q 24-420 кВ. Реалізація моделей для ОПН PERLIM Q 24 кВ наведено нижче (рис. 3.4.1.(а-г)). Параметри для схмотехнічних моделей розраховані раніше (див. розділ 3.1-3.2)

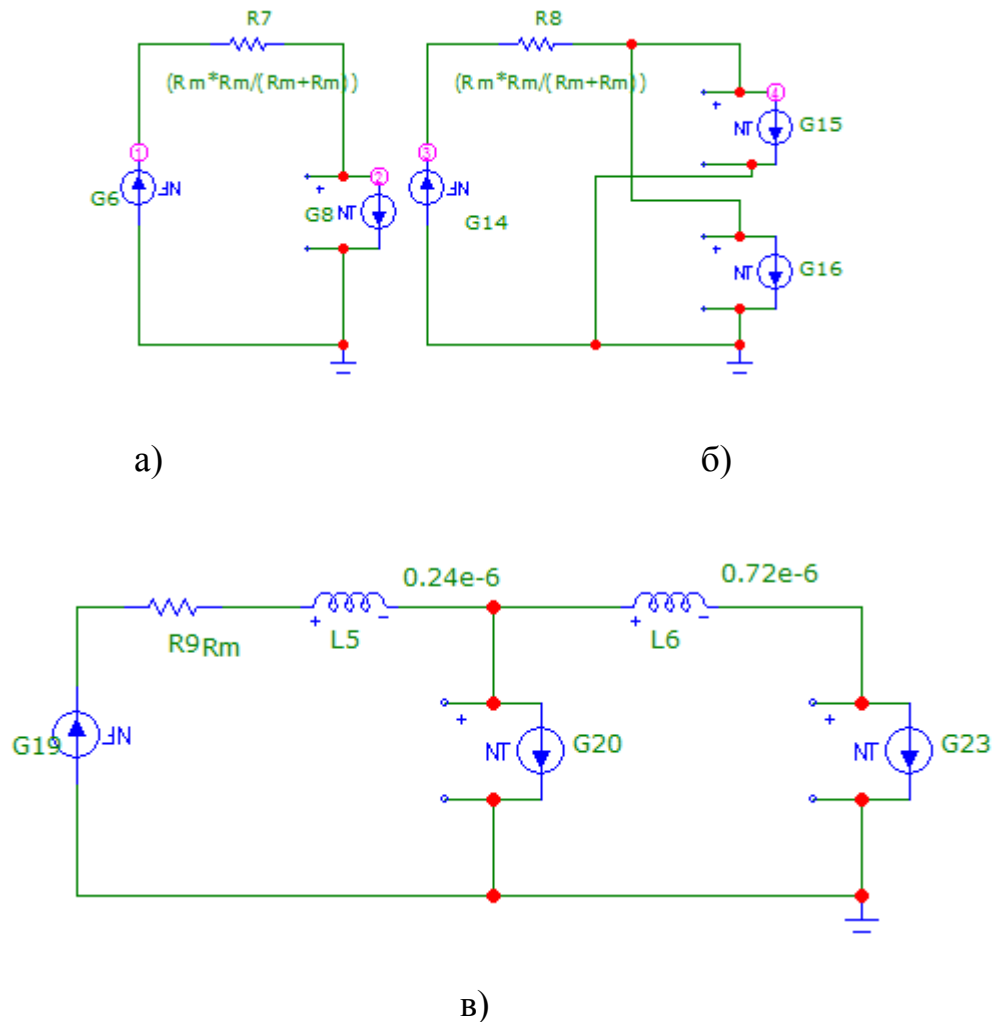
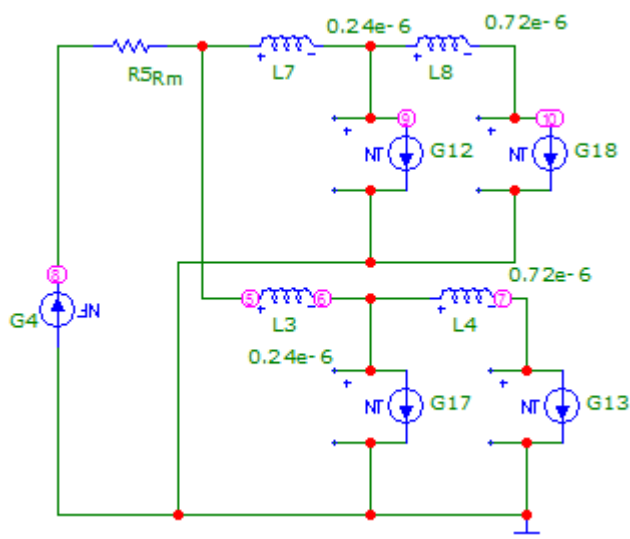


Рис. 3.4.1. Схемо-технічні моделі ОПН PERLIM Q 24 кВ в середовищі Micro-Cap: а) – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; б) – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; в) – спрощена схема 2004 року



г)

Рис. 3.4.1. Схемо-технічні моделі PERLIM Q 24 кВ в середовищі Micro-Cap (продовження): г) -- спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

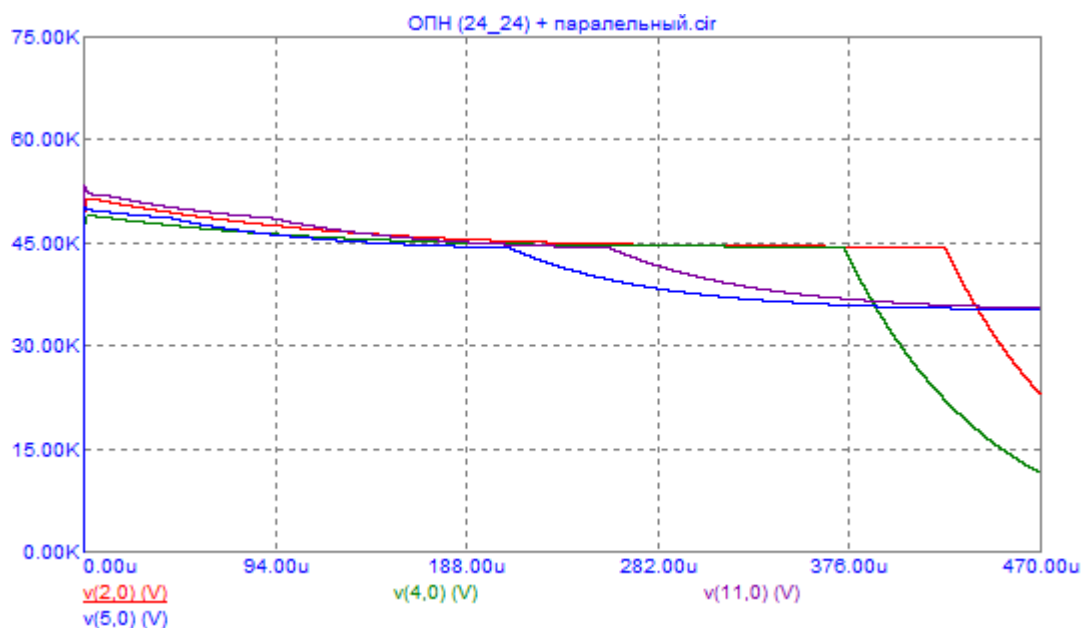


Рис. 3.4.2. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 24 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

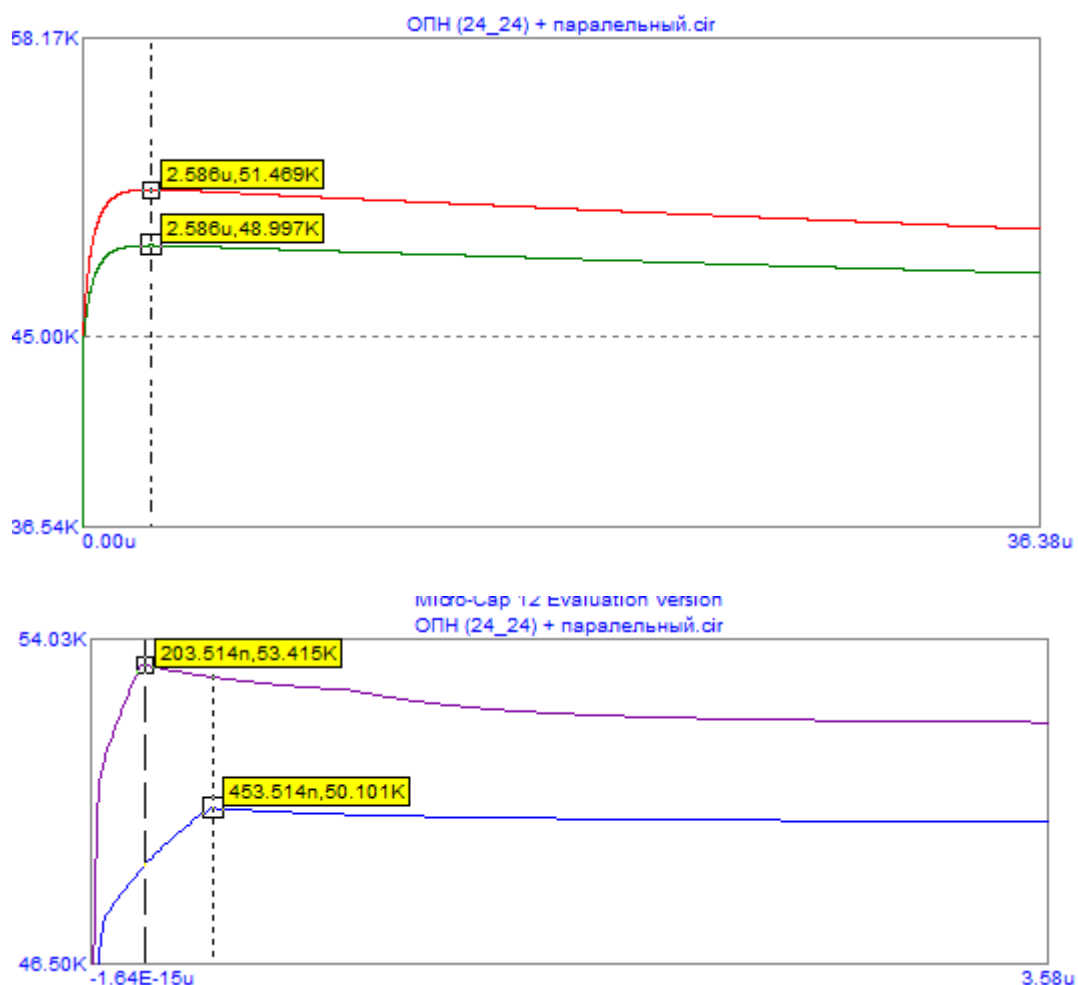


Рис. 3.4.3. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 24 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива — спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

Результати моделювання інших випробних ОПН, а саме моделей PERLIM Q : 36-36, 52-51, 72-66, 100-96, 123-120, 145-138, 170-150, 245-210, 300-216, 420-330, наведені нижче у вигляді графіків кривих залишкової напруги (Рис. 3.4.4. – Рис. 3.4.23).

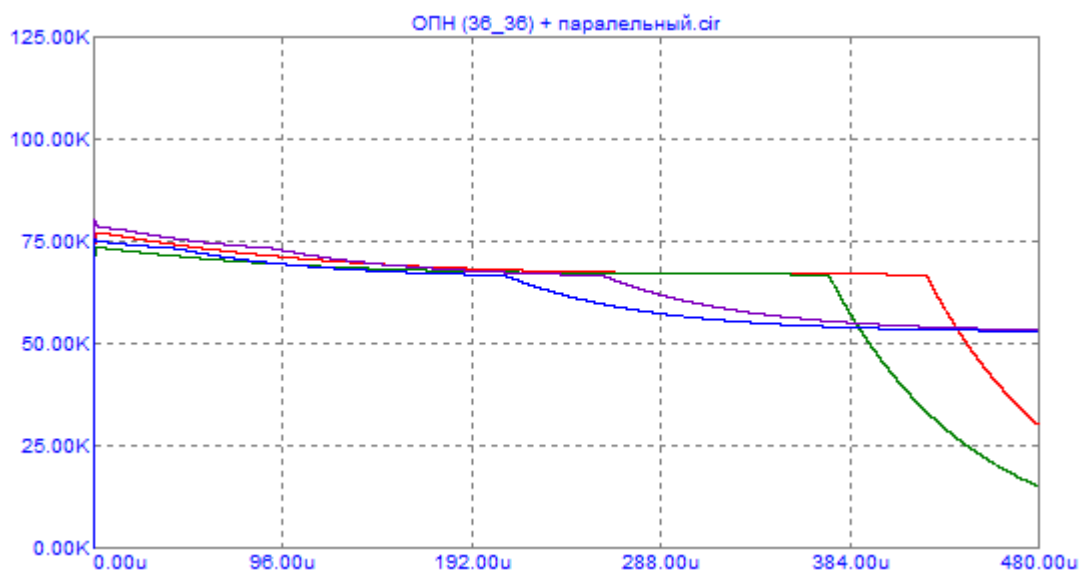


Рис. 3.4.4. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 36 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

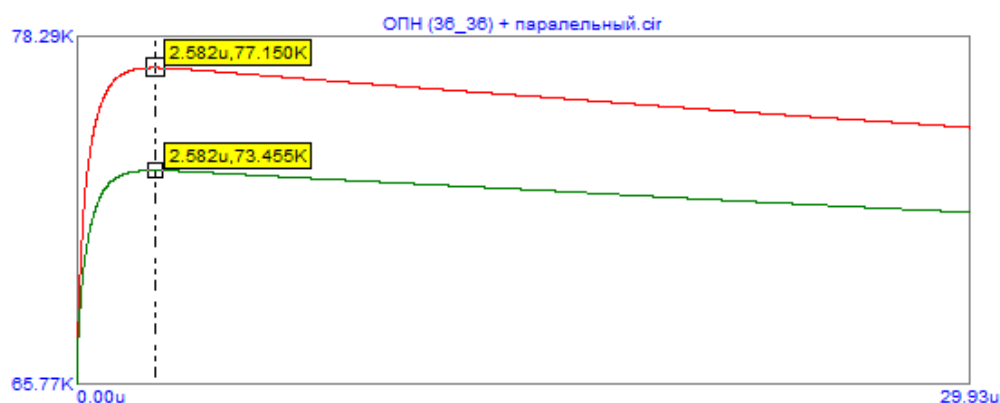


Рис. 3.4.5. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 36 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН;



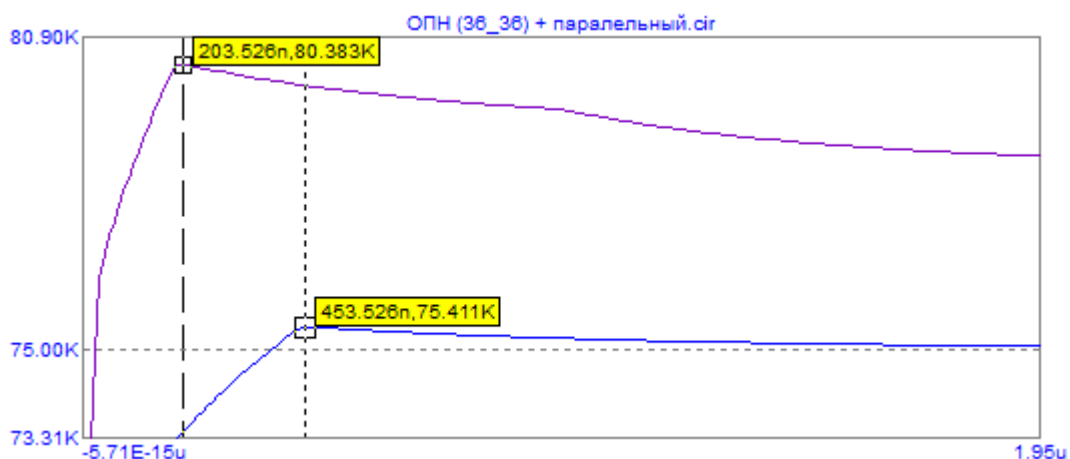


Рис. 3.4.5. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 36 кВ та пікові значення залишкової напруги (продовження): фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

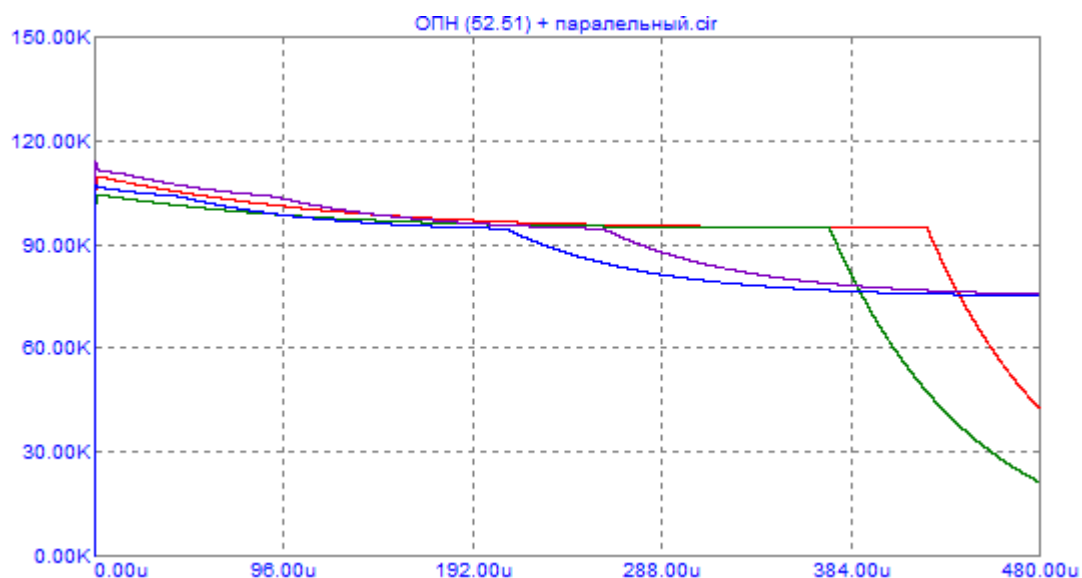


Рис. 3.4.6. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 52-51 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

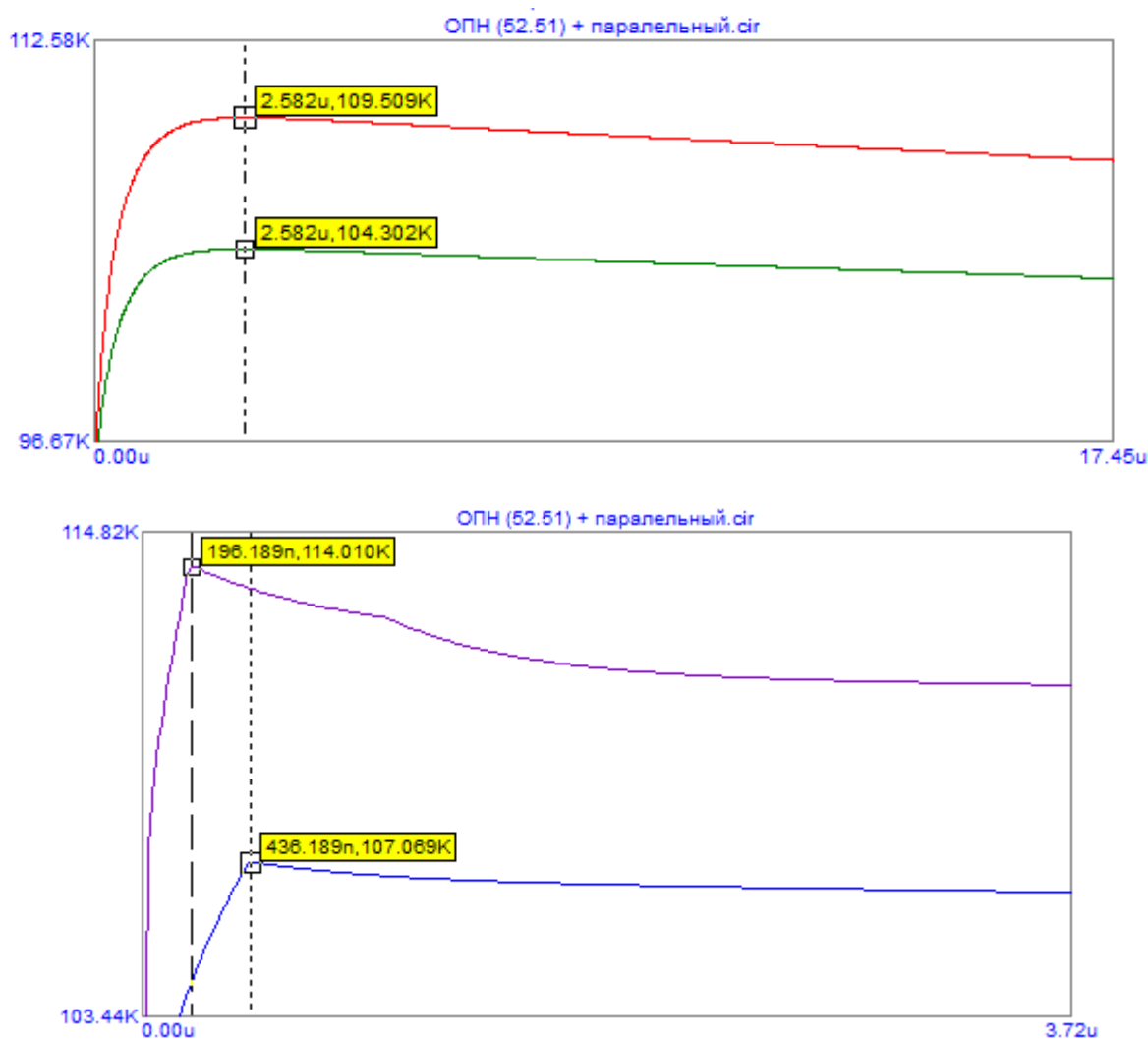


Рис. 3.4.7. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 52-51 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива — спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

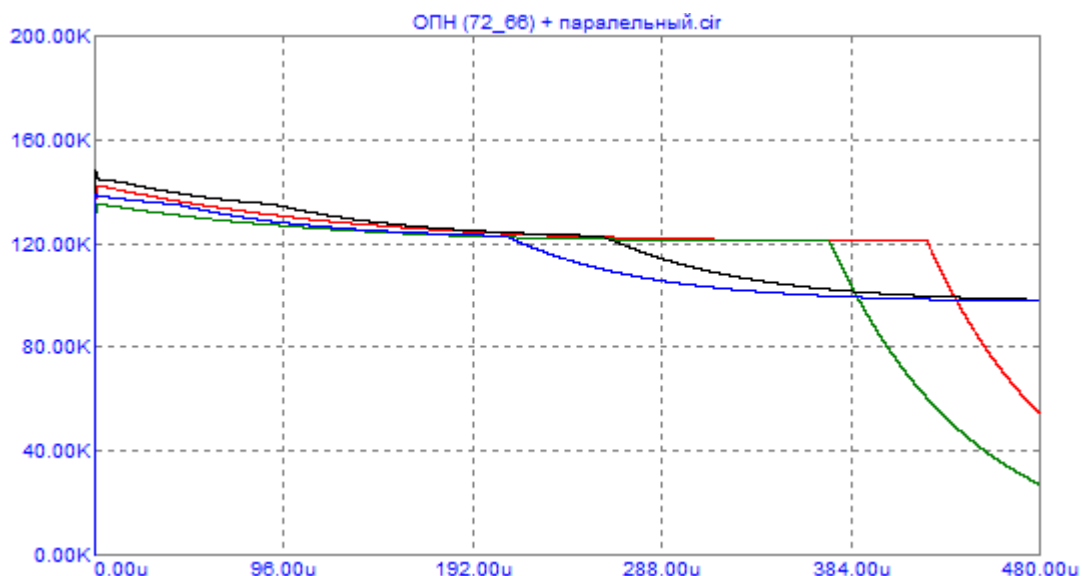


Рис. 3.4.8. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 72-66 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

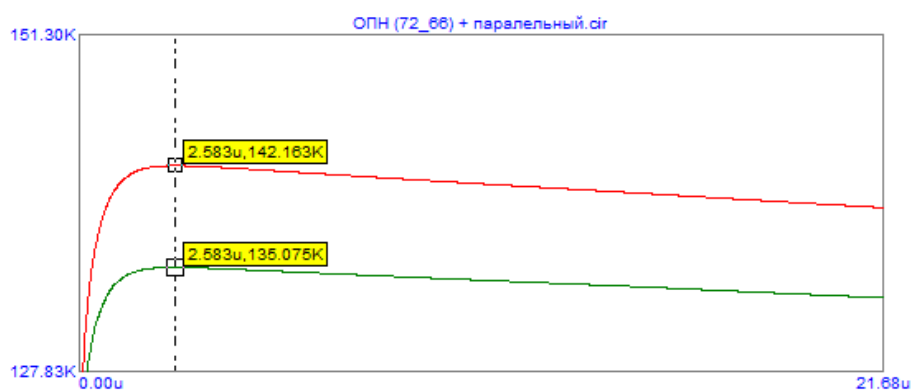


Рис. 3.4.9. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 72-66 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН;

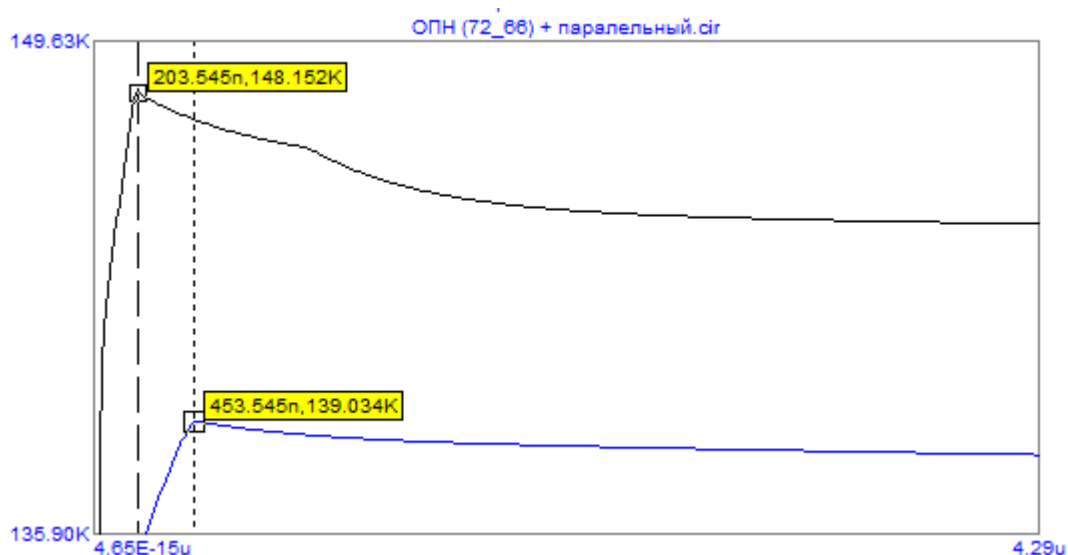


Рис. 3.4.9. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 72-66 кВ та пікові значення залишкової напруги (продовження) : чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

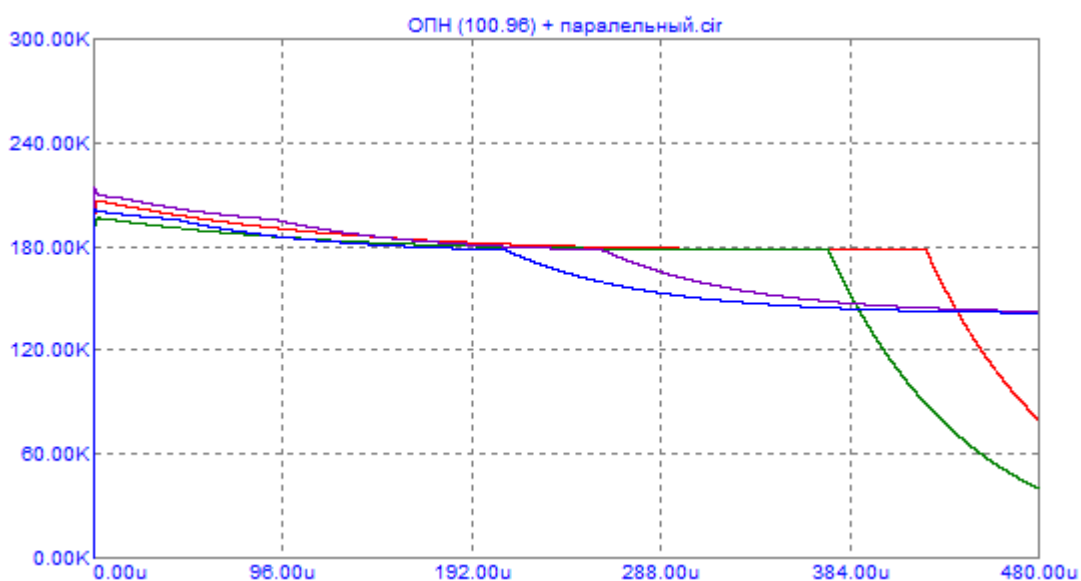


Рис. 3.4.10. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 100-96 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

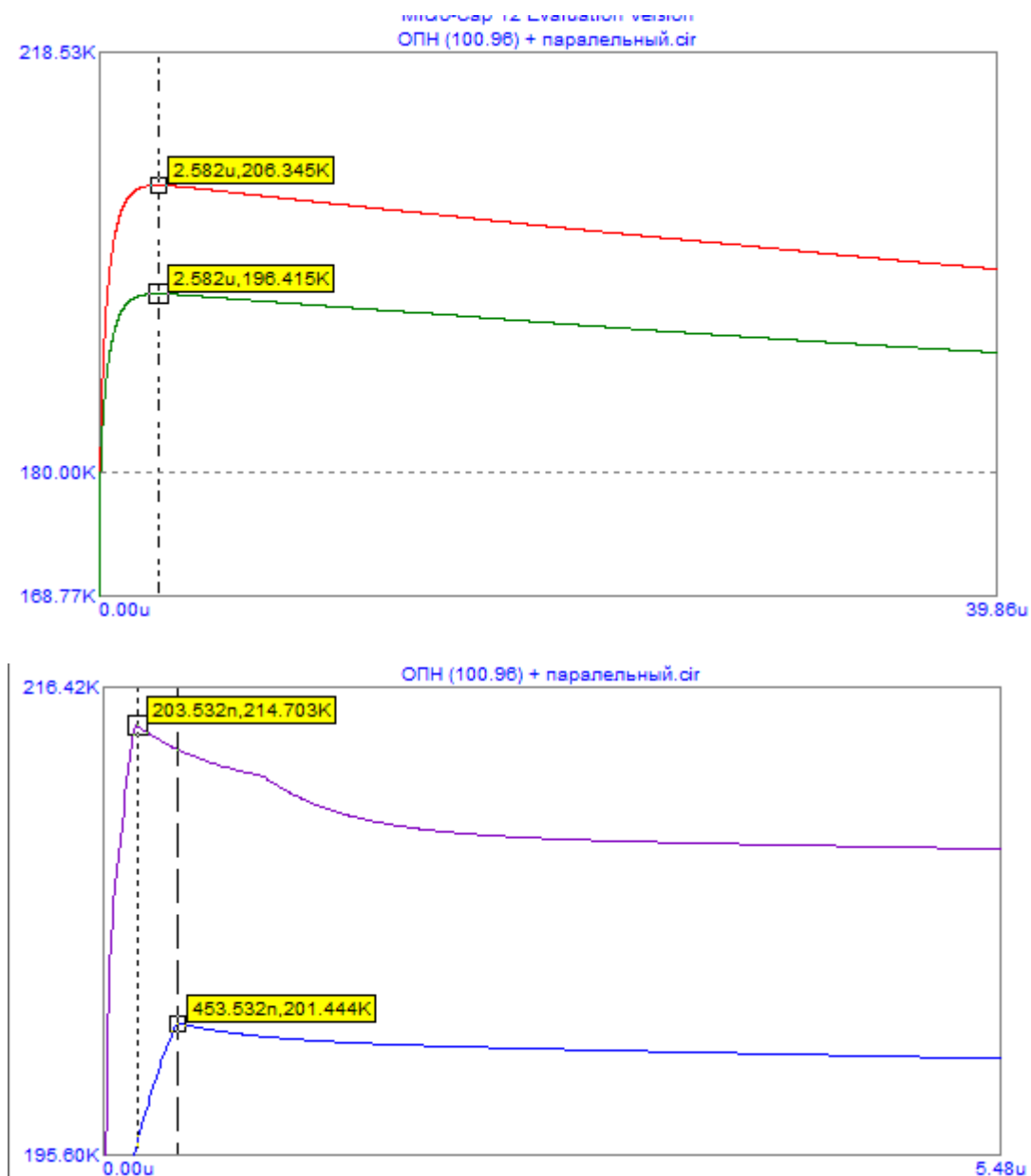


Рис. 3.4.11. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 100-96 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива — спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

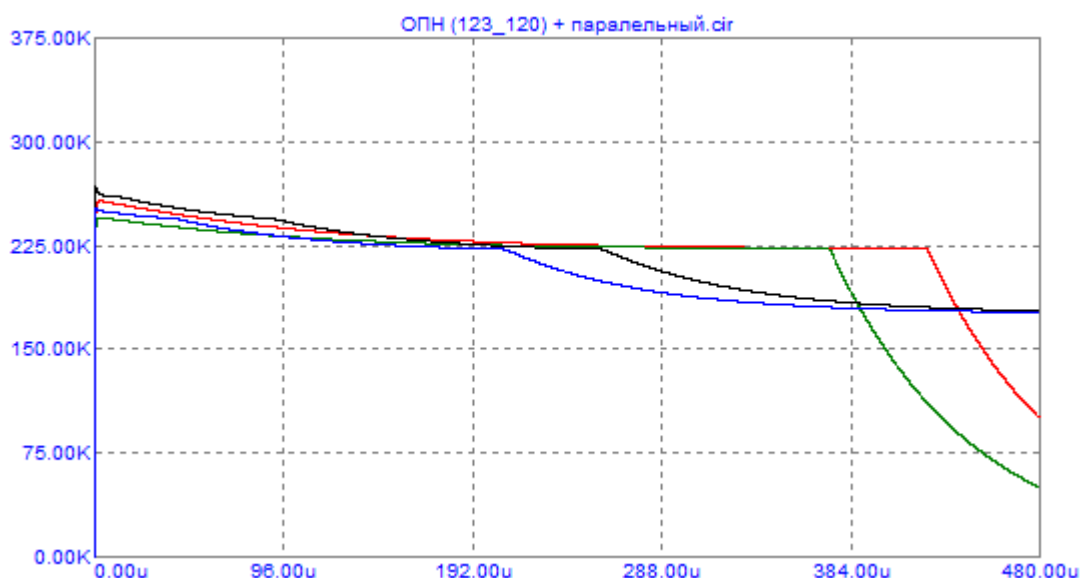


Рис. 3.4.12. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 123-120 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

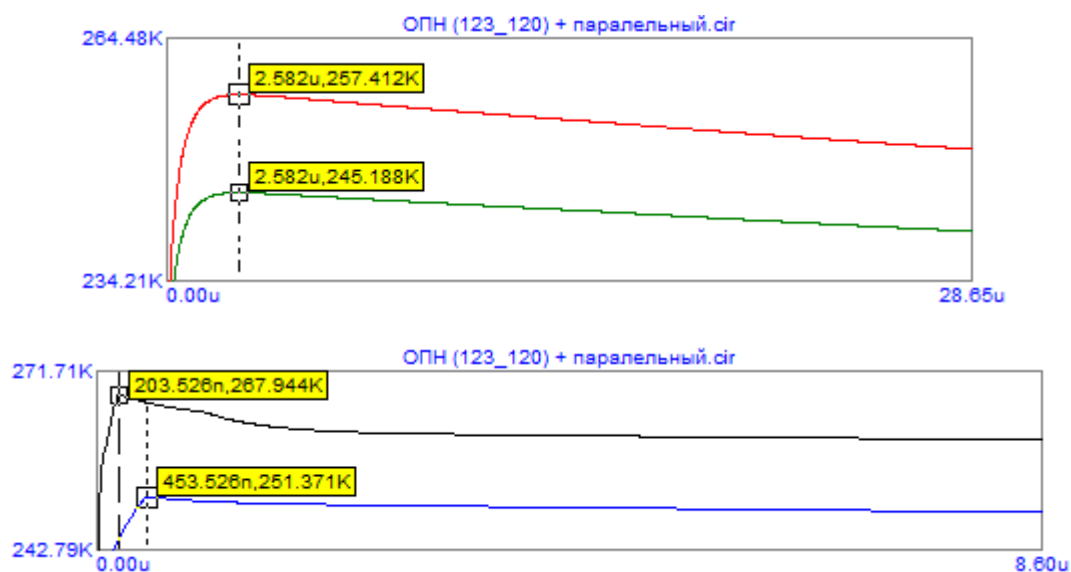


Рис. 3.4.13. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 123-120 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

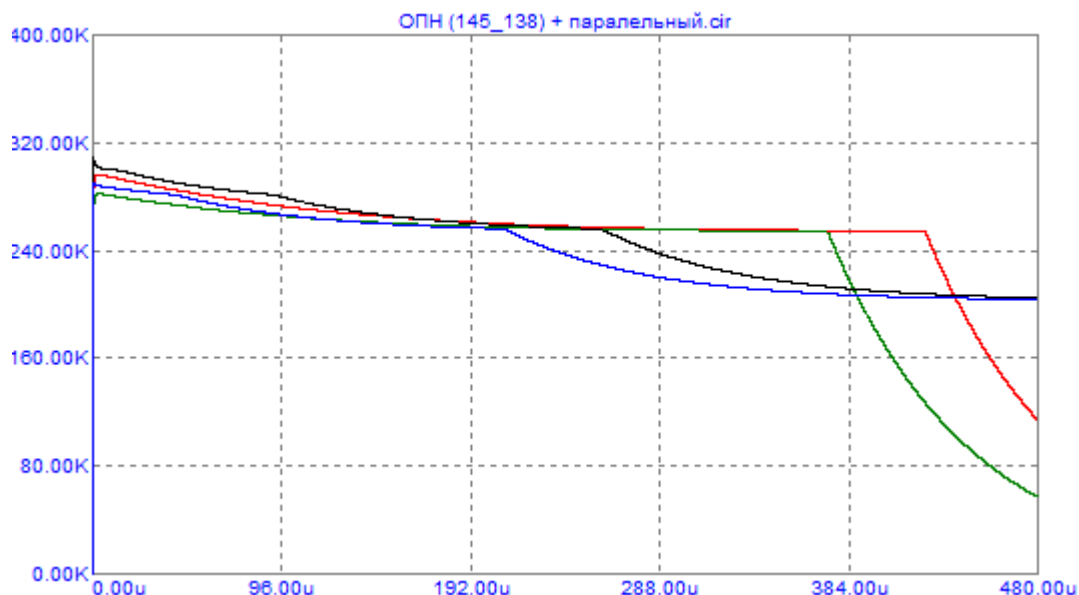


Рис. 3.4.14. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 145-138 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

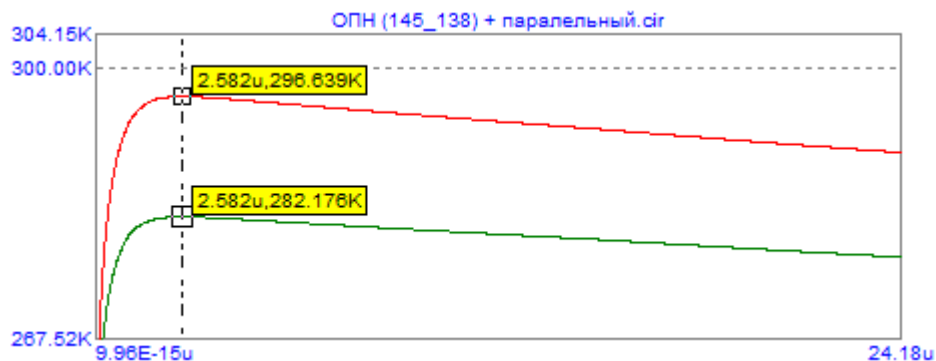


Рис. 3.4.15. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 145-138 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН;

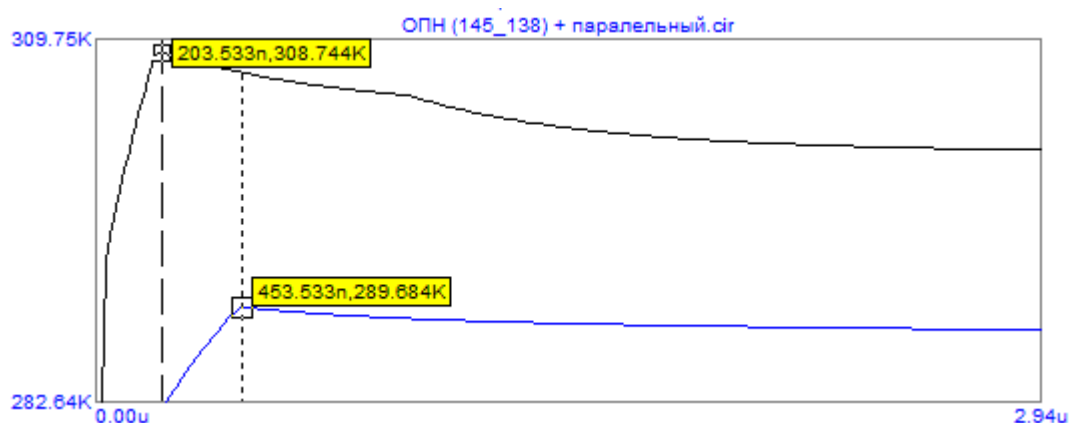


Рис. 3.4.15. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 145-138 кВ та пікові значення залишкової напруги (продовження): чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

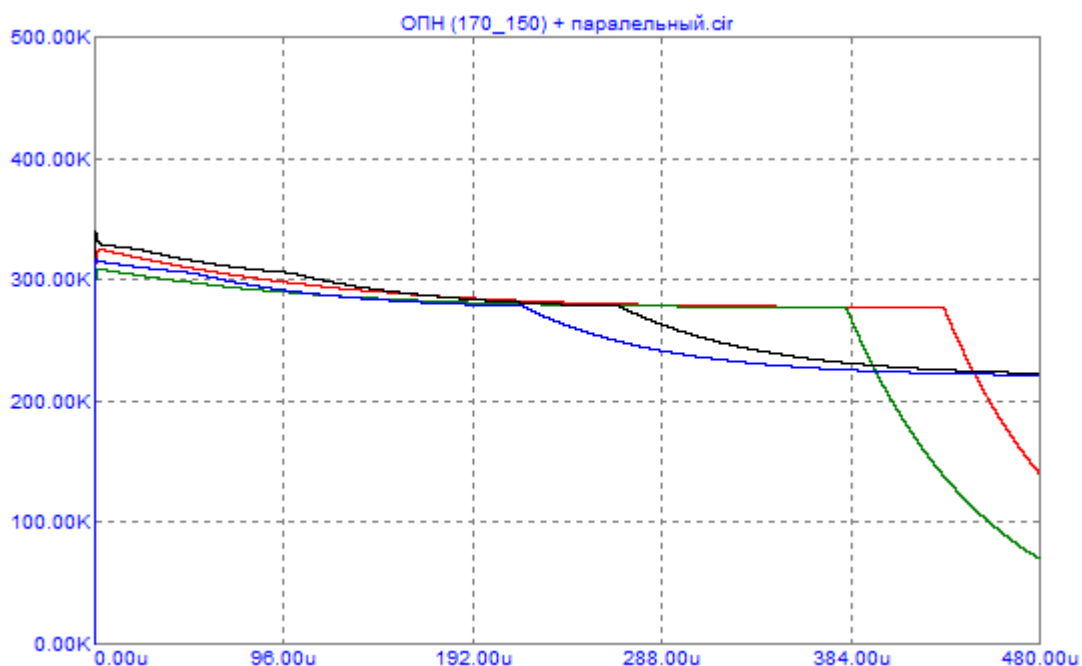


Рис. 3.4.16. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 170-150 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН



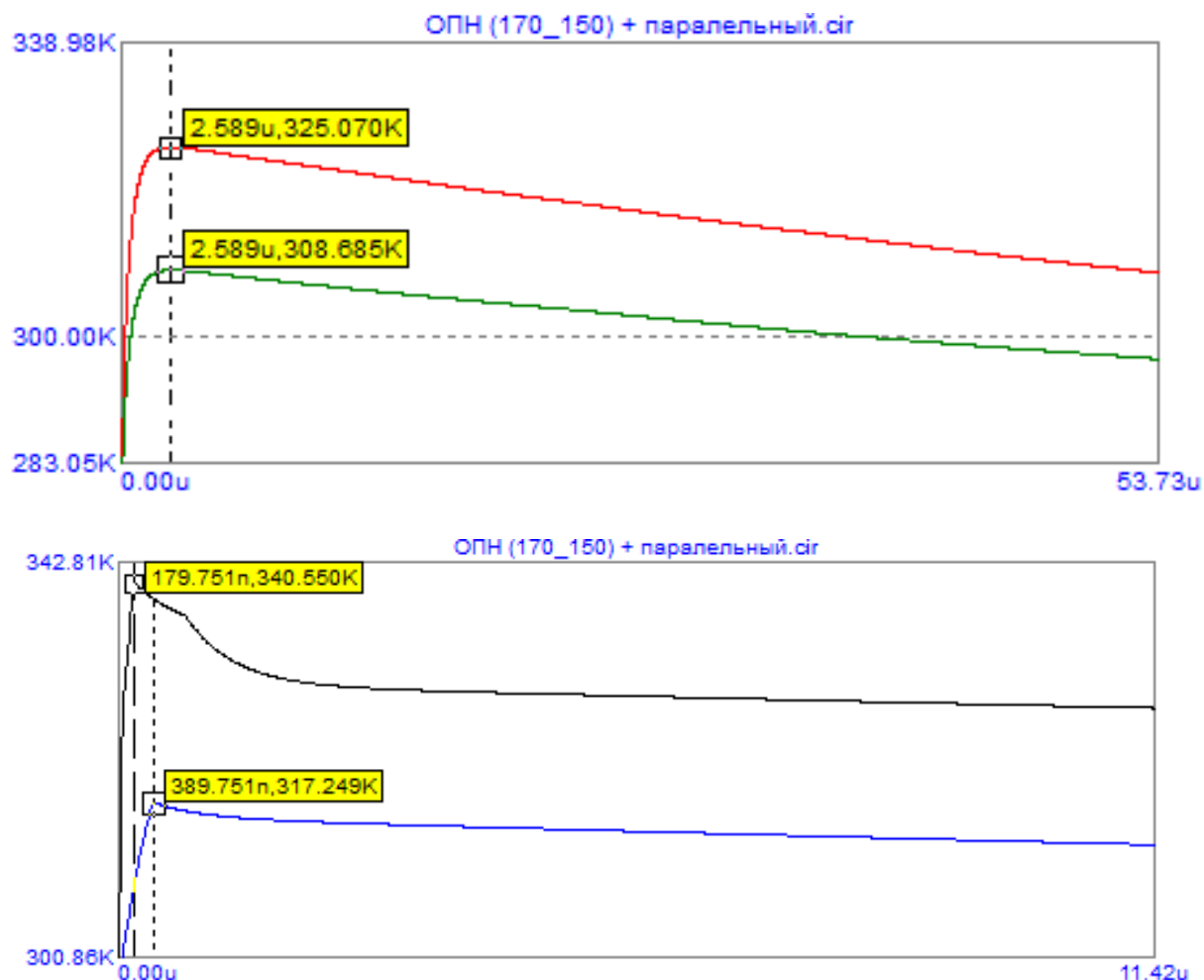


Рис. 3.4.17. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 170-150 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива — спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

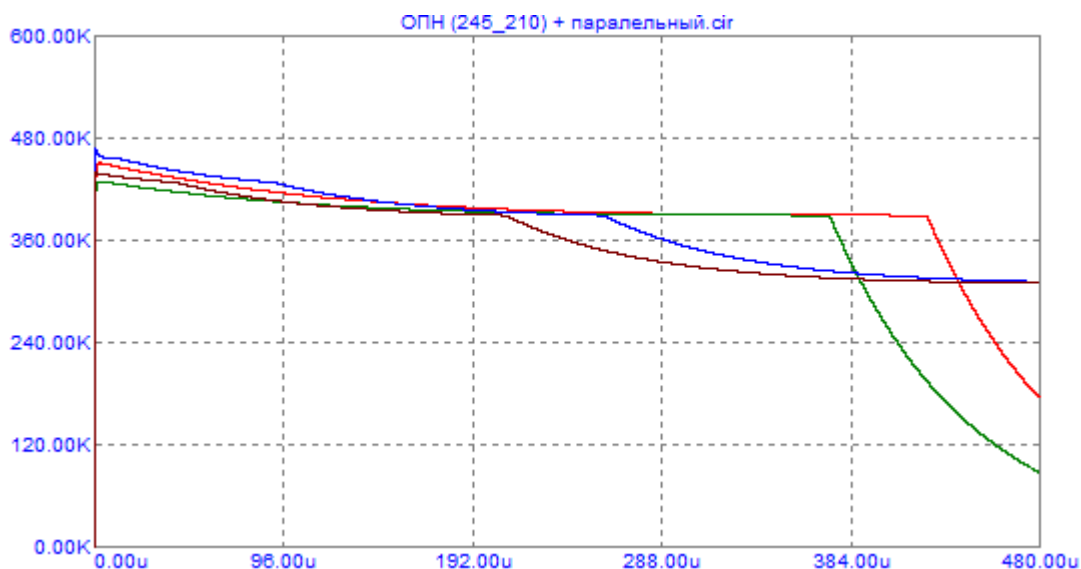


Рис. 3.4.18. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 245-510 кВ:  
червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива –  
модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; синя крива –  
спрощена схема 2004 року; коричнева крива – спрощена схема 2004 року з  
паралельним ОПН

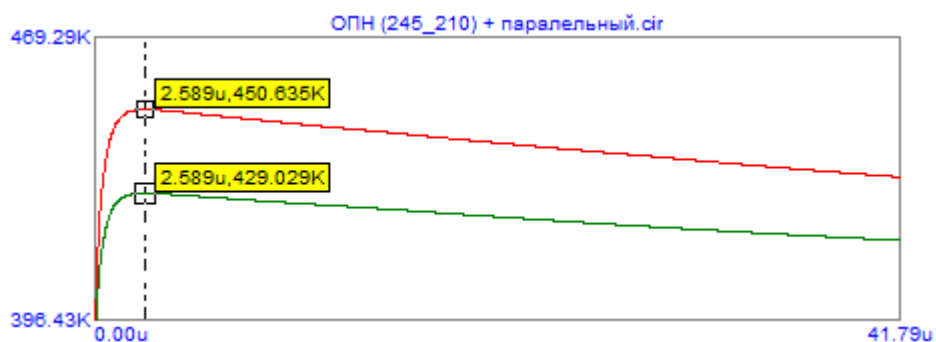


Рис. 3.4.19. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q  
245-210 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель  
запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на  
кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН;

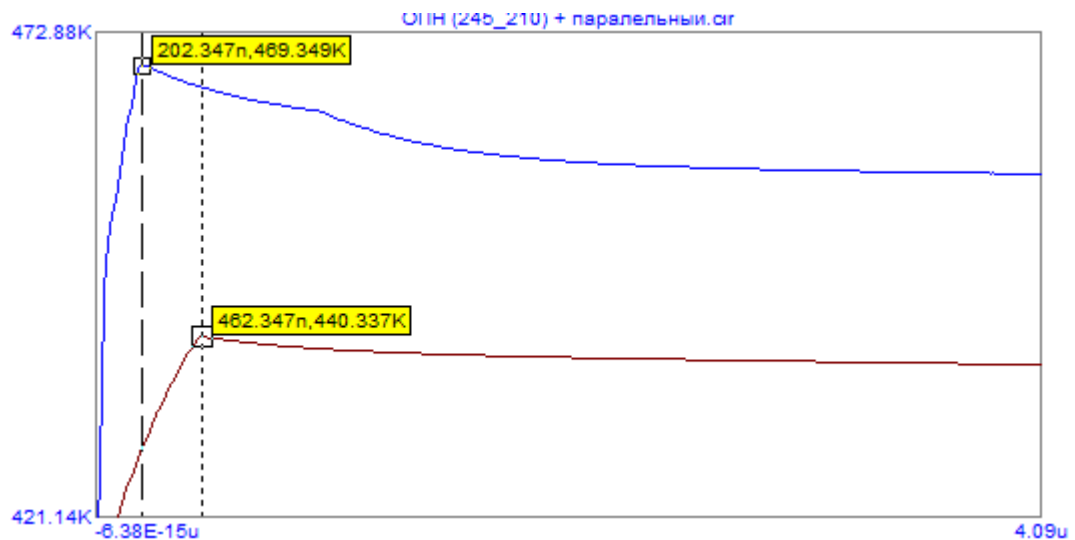


Рис. 3.4.19. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 245-210 кВ та пікові значення залишкової напруги (продовження): фіолетова крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

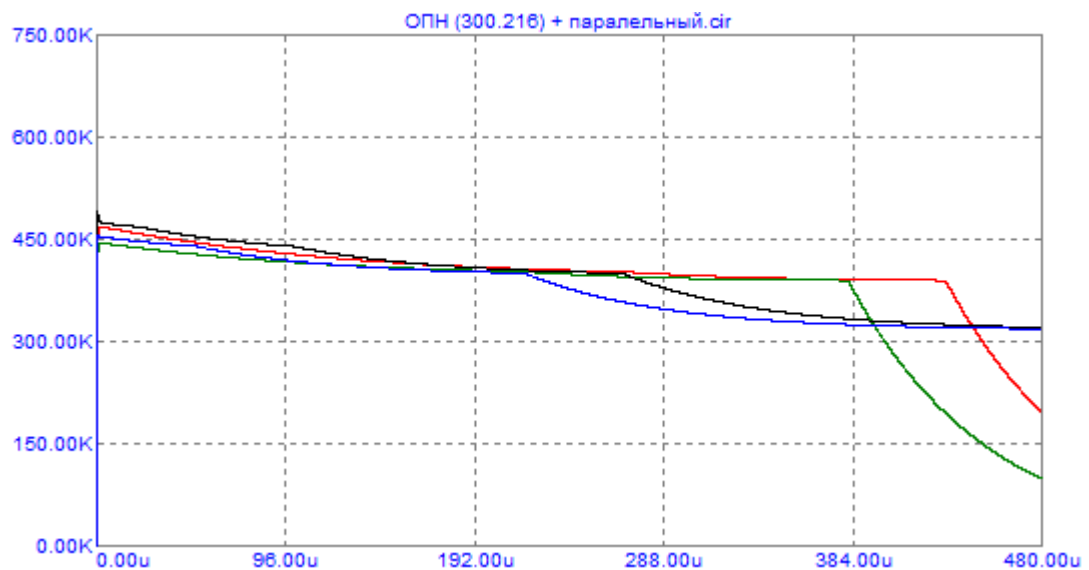


Рис. 3.4.20. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 300-216 кВ: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

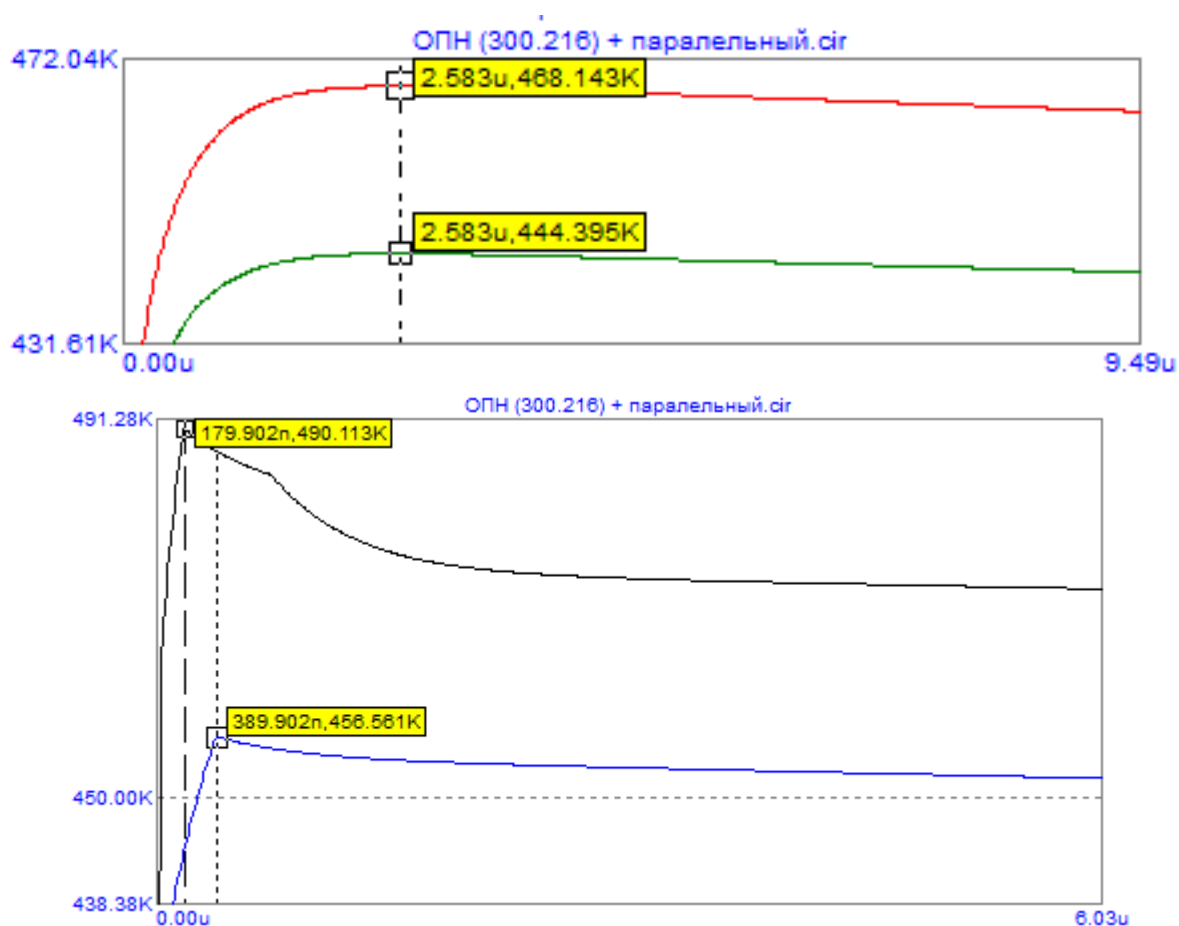


Рис. 3.4.21. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 300-216 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

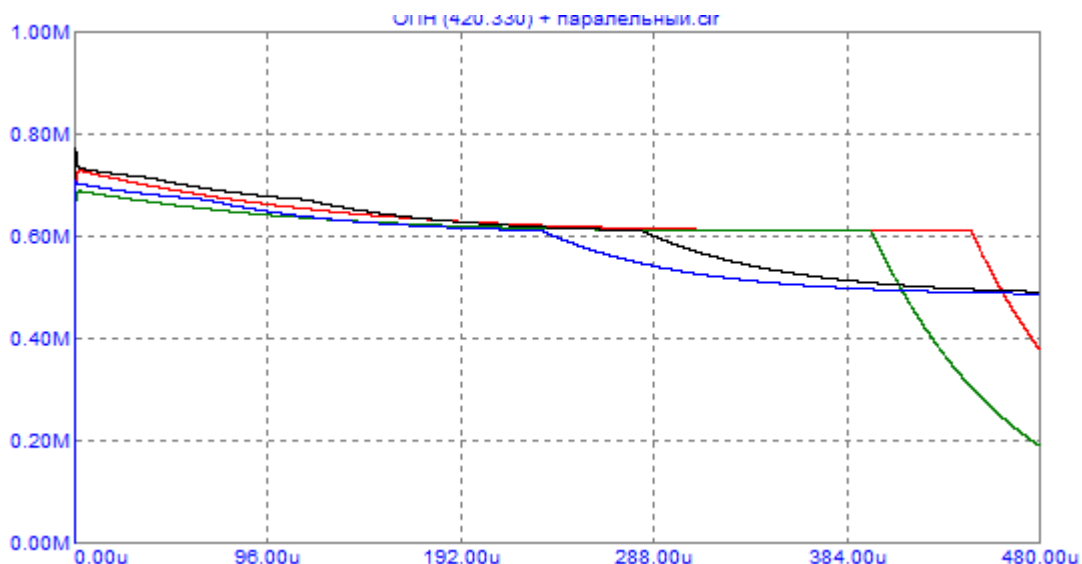


Рис. 3.4.22. Криві залишкової напруги для ОПН PERLIM Q 420-330 кВ:  
червона крива – модель запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива –  
модель запропонована на кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН; чорна крива –  
спрощена схема 2004 року; синя крива – спрощена схема 2004 року з  
паралельним ОПН

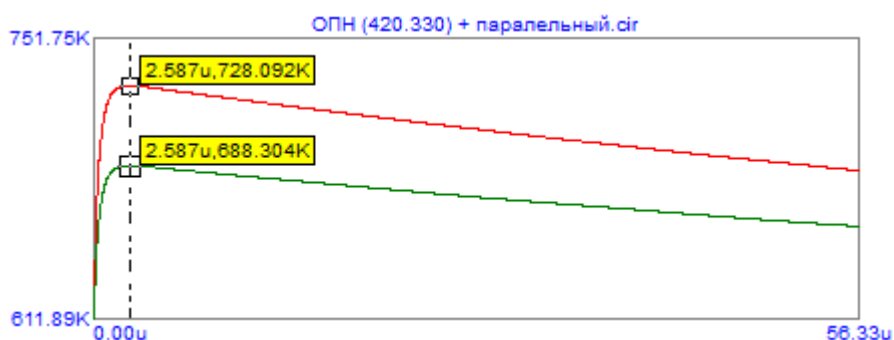


Рис. 3.4.23. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q  
420-330 кВ та пікові значення залишкової напруги: червона крива – модель  
запропонована на кафедрі ТЕВН; зелена крива – модель запропонована на  
кафедрі ТЕВН з паралельним ОПН;

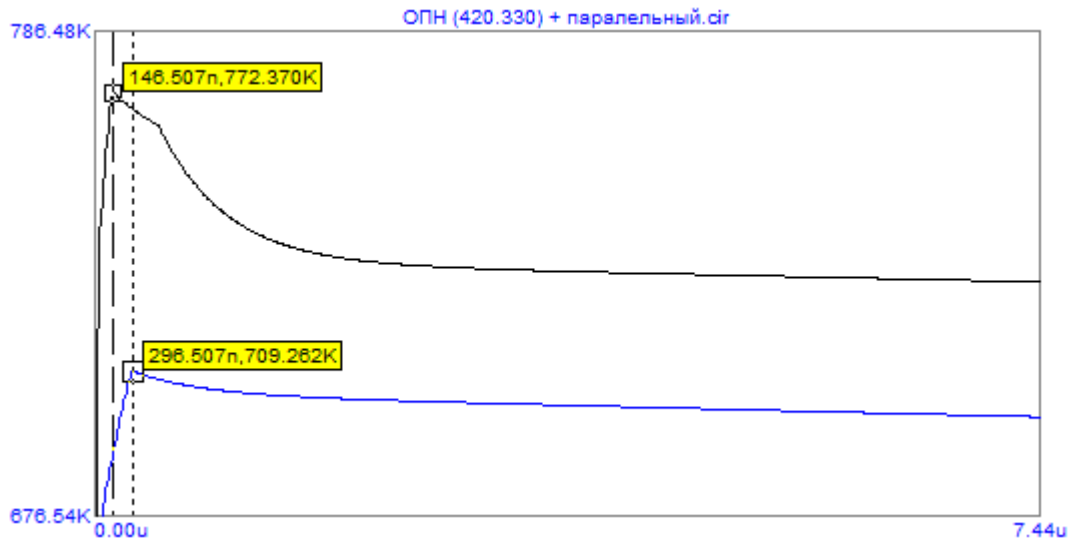


Рис. 3.4.23. Криві залишкової напруги (збільшено) для ОПН PERLIM Q 420-330 кВ та пікові значення залишкової напруги (продовження): чорна крива – спрощена схема 2004 року; синя крива — спрощена схема 2004 року з паралельним ОПН

### 3.5. Дослідження впливу синусоїдальної напруги на роботу обмежувача перенапруг нелінійного

Наступним етапом даної роботи буде дослідження впливу синусоїдальної напруги на роботу ОПН. Для цього замість еквівалентного джерела живлення за допомогою суматора об'єднуємо два джерела напруги один з яких імітує синусоїдальну напругу описану рівнянням [17]:

$$\frac{362e^3}{\sqrt{3}} * (\sqrt{2}) * \sin(2 * \pi * 50t).$$

Інше джерело імітує імпульс перенапруги описане рівнянням:

$$1,044 * 950e^3 * (\exp(-1,4e^{4t}) - \exp(-1.917e^{6t})),$$

Для досліду взято ОПН серії PERLIM Q420 кВ. Еквівалентний опір даної схеми дорівнює 175 Ом. Буде розглянуто випадок як спрацьовує ОПН в різний момент часу від 0,0025 до 0,02 з кроком 0,0025. Реалізація даної схеми та отримані результати наведено нижче(Рис.3.5.1. – Рис. 3.5.9) :

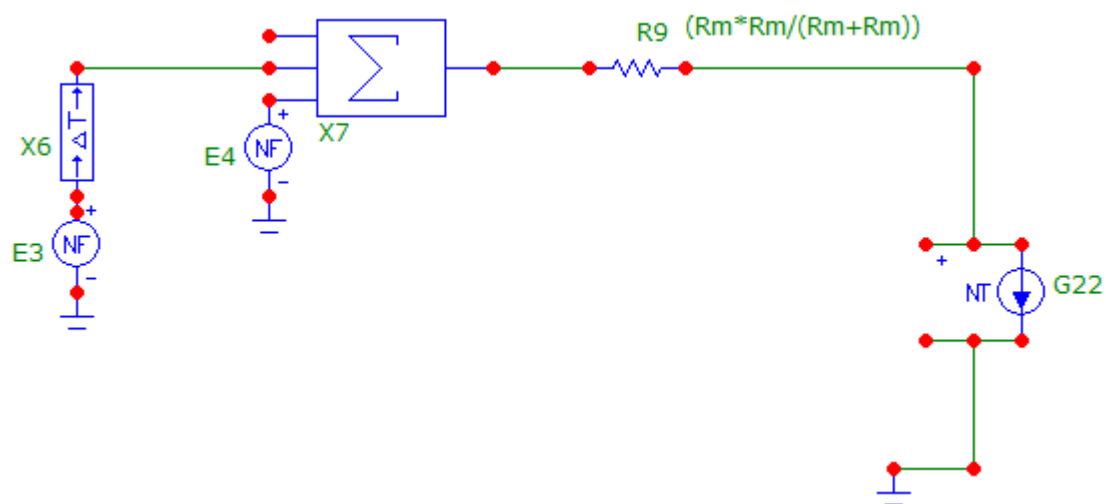


Рис. 3.5.1. Модель ОПН PERLIM Q 24 кВ в середовищі Micro-Cap при дії на ОПН синусоїдальної напруги:

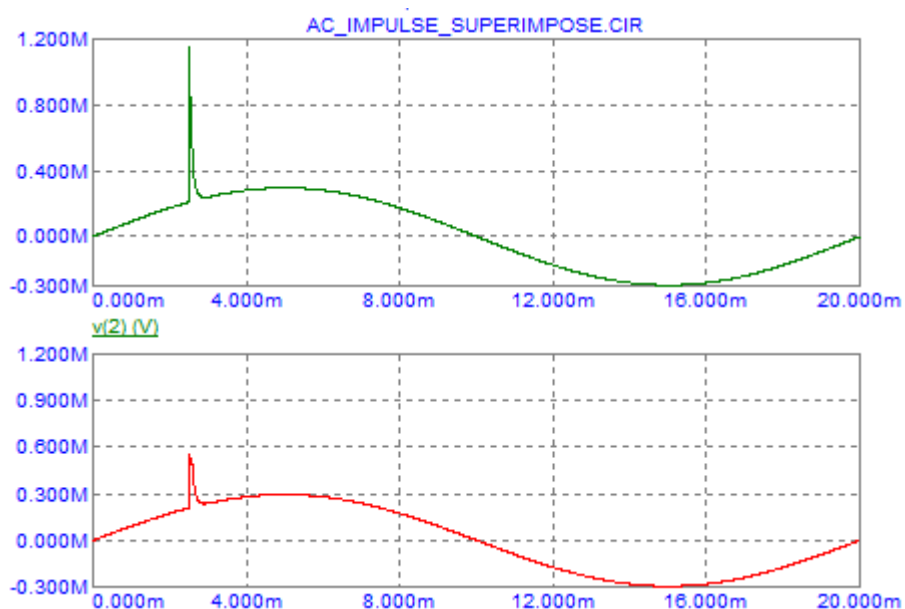


Рис. 3.5.2. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,0025

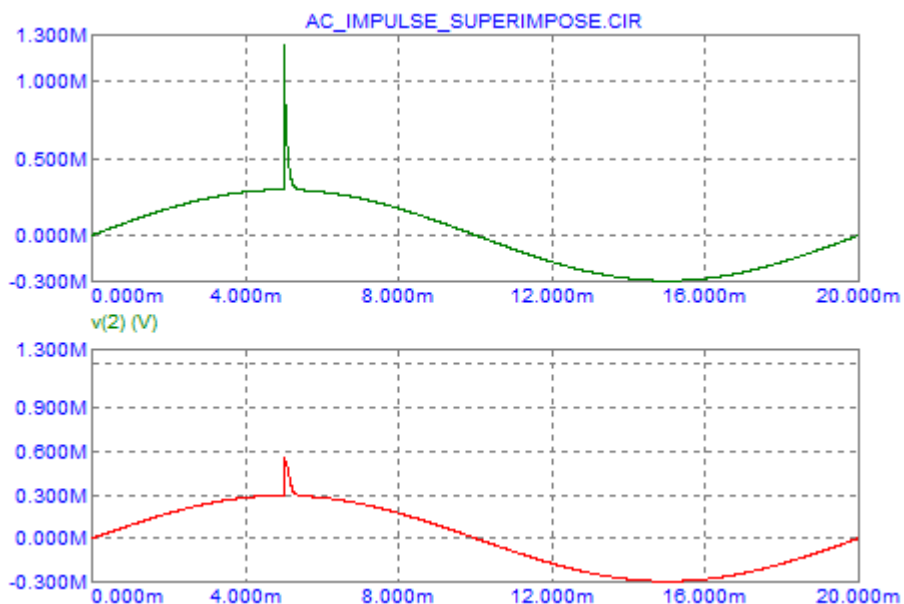


Рис. 3.5.3. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,005

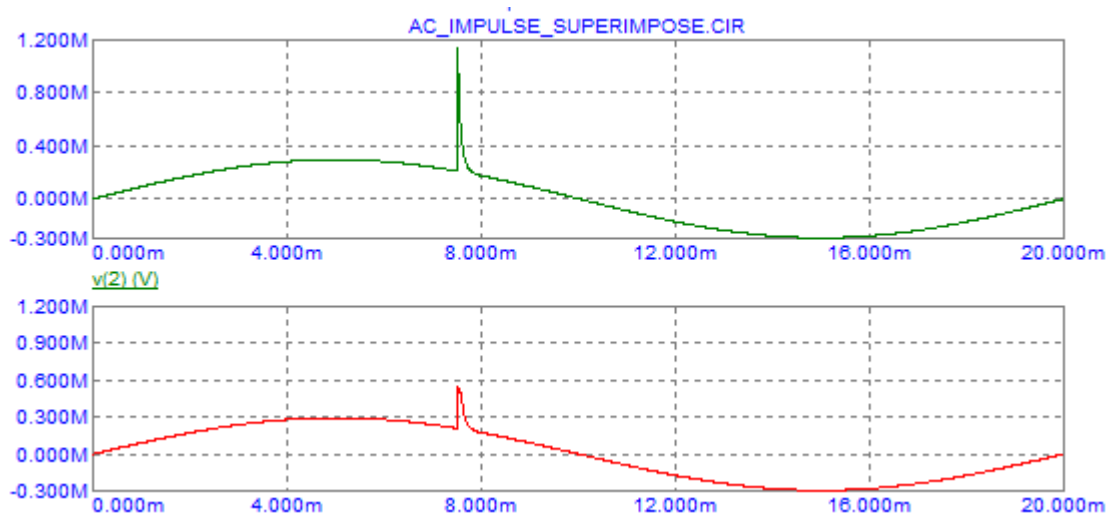


Рис. 3.5.4. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,0075



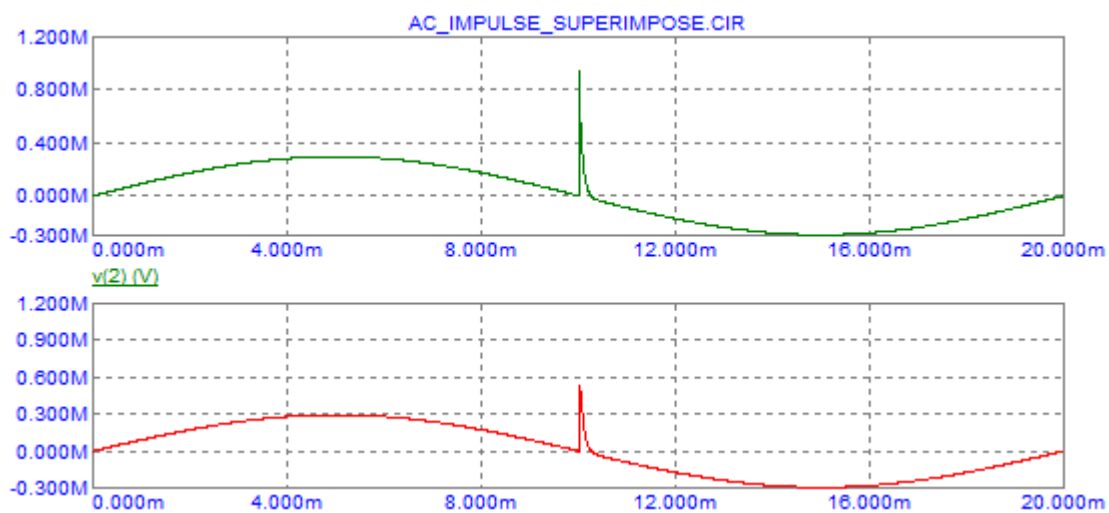


Рис. 3.5.5. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,01

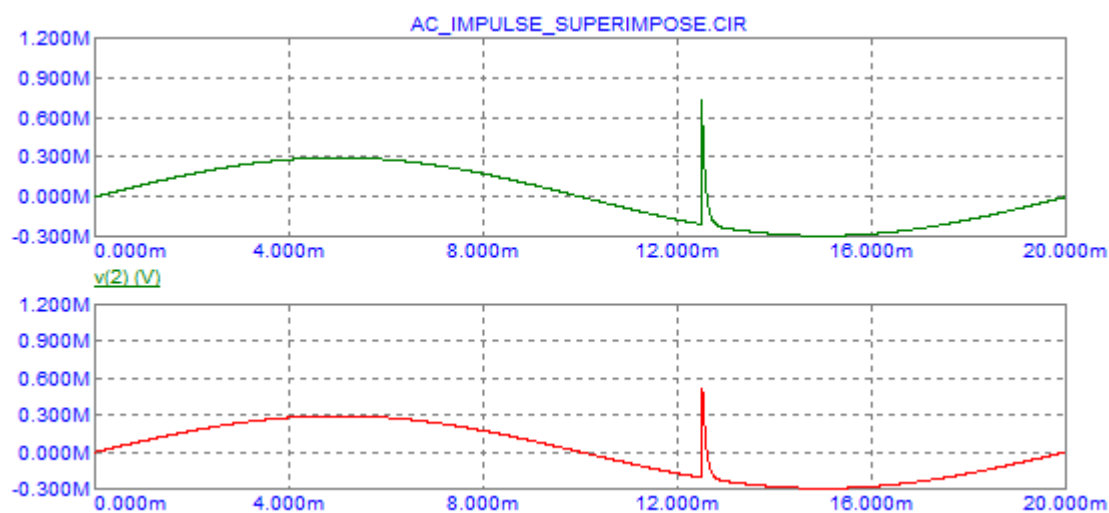


Рис. 3.5.6. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,0125

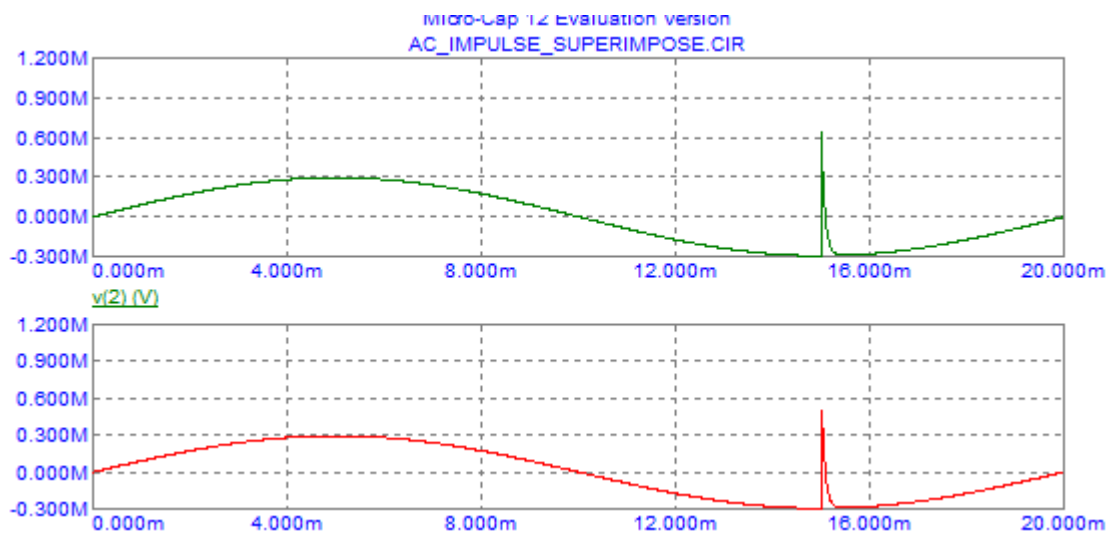


Рис. 3.5.7. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,015

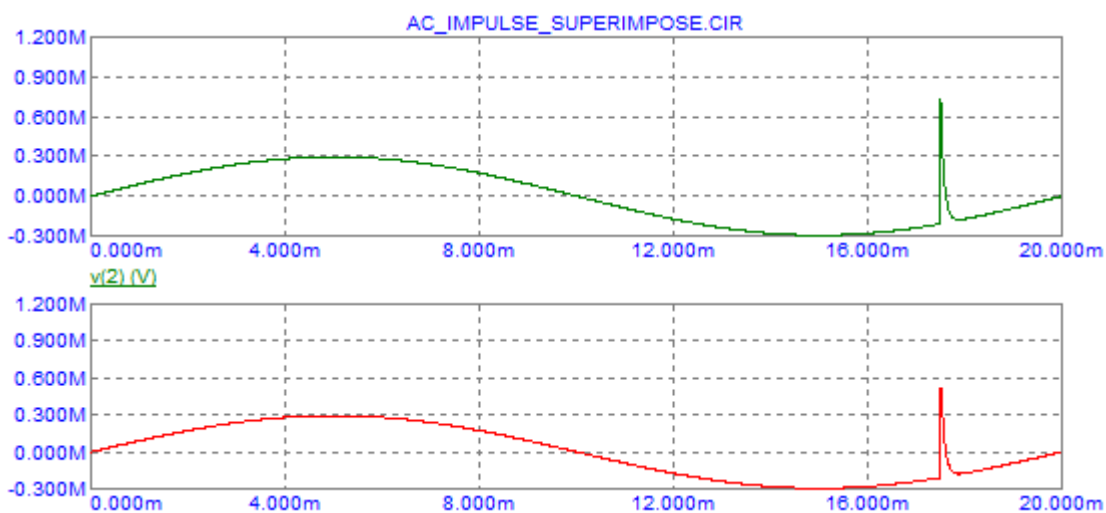


Рис. 3.5.8. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,0175

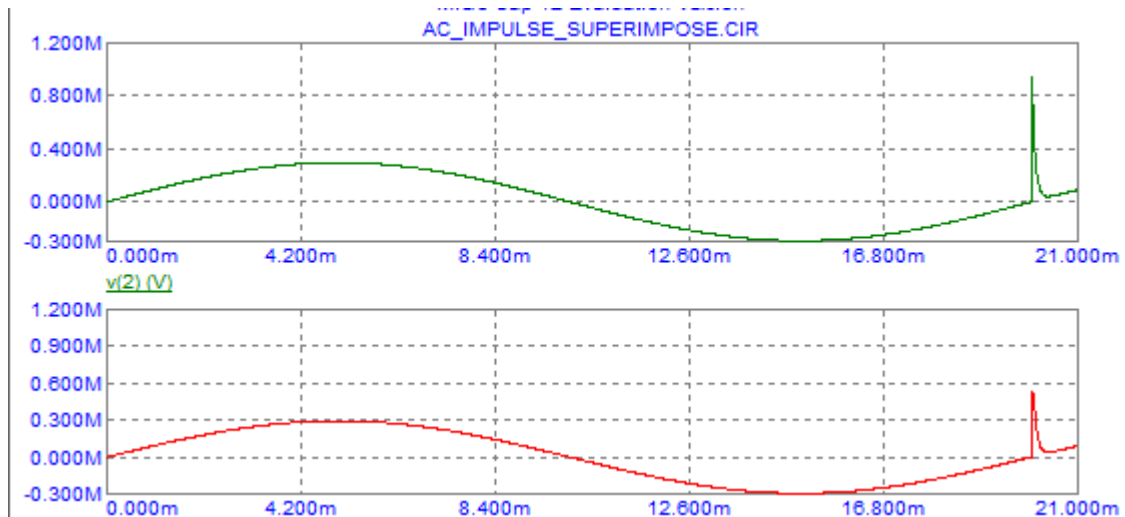


Рис. 3.5.9. Криві імпульсу перенапруги (зелена крива) та рівня залишкової напруги в момент часу 0,02

Результати моделювання занесені до таблиці 8

Таблиця 8. Результати моделювання впливу синусоїдальної напруги на роботу обмежувача перенапруг нелінійного

Момент часу	Імпульс перенапруги, кВ	Рівень залишкової напруги, кВ	Рівень зрізаної напруги, кВ	Рівень зрізаної напруги, %
0,0025	1147	551	596	51,96
0,005	1233	557,393	675,607	54,79
0,0075	1146	551,612	594,388	51,87
0,01	937,325	535,82	401,505	42,84
0,0125	730,948	516,106	214,842	29,39
0,015	644,574	505,664	138,91	21,55
0,0175	731,342	516	215,342	29,44
0,02	938,035	535,824	402,211	42,88

### 3.6 Висновки до розділу 3

1) Було проведено моделювання удосконаленої моделі обмежувачів перенапруг нелінійних запропонованої на кафедрі «Техніки та електрофізики високих напруг». Для оцінки успішності моделі було проведено порівняння з існуючими моделями 1992 року та спрощеною моделлю 2004 року. Для моделювання було взято ОПН серії ABB PERLIM Q для напруги мережі 24 -

420 кВ. Реалізація удосконаленої моделі виконувалася за допомогою аналітичного вигляду вольт-амперної характеристики. Максимальні відносні похибки залишкової напруги занесені до таблиці 7. Моделі запропоновані на кафедрі ТЕВН показують приблизно однаковий результат і не перевищують 1,06 % від значення, що наведені у каталозі. Спрощена модель 2004 року показує найточніший варіант і не перевищує 0,6 %. Модель IEEE показує найгірший результат, тому використання даної моделі можна вважати застарілим.

2) Моделювання ОПН до якої приєднано дві лінії нескінченної довжини показало, що значення залишкової напруги збільшені в порівнянні з дослідом в розділах 2.3 та 3.1. Результати отримані при моделюванні ОПН, що виглядає як нелінійний резистор, показали, що при використанні аналітичного виразу апроксимації вольт - амперної характеристики результати не перевищують допустимі межі точності. Удосконалення моделі за рахунок впровадження індуктивностей з'єднувальних проводів збільшує точність моделі.

3) Змоделювано та порівняно роботу одиничного ОПН та однакових ОПН, що приєднані паралельно за допомогою моделі запропонованої на кафедрі «ТЕВН» та спрощеної моделі 2004 року . Як бачимо за результатами моделювання ефективність роботи двох паралельних ОПН знижена у двох моделях, оскільки значення залишкової напруги при одиничному ОПН показує більше значення. Випробними моделями було взято ОПН АВВ серії PERLIM Q 24-420 кВ. Максимальна відносна похибка при моделюванні паралельної роботи ОПН 13.2 % для удосконаленої моделі та 8,8 % для моделі 2004 року.

4) Проведено моделювання спрацювання ОПН при дії на нього імпульсу напруги в різний момент часу. Результати моделювання показали, що ОПН максимально спрацює в момент часу 0,005 (на 54,79 %) та найменше в момент часу 0,015 (на 21,55 %).

## **4. СТАРТАП – ПРОЕКТ. ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ АПРОКСИМАЦІЇ ВОЛЬТ- АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ ТА ВИКОРИСТАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ ОПН**

### **4.1. Опис ідеї проекту**

Обмежувачі напруг нелінійні широко застосовуються для захисту ізоляції електричного устаткування станцій та підстанцій та електричних мереж від різних типів перенапруг. Нові технологічні рішення, модернізація електрообладнання виставляє нові вимоги щодо захисту від атмосферних та комутаційних перенапруг. Технічна перевага обмежувачів перенапруг перед вентильними розрядниками уже виявлена, але методи розрахунку та підбору потенційно найкращого обмежувача перенапруг для нового об'єкту котрий необхідно захистити, постійно змінюються та покращуються. Зважаючи на це виникає необхідність проведення імітаційних та експериментальних досліджень. Цьому сприяє розвиток схемотехнічного моделювання. Тому потрібно визначити доцільне впровадження та застосування нового методу моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг. Це можливо тільки за допомогою техніко-економічного порівняння схемотехнічних моделей та методів моделювання. При цьому потрібно врахувати складність впровадження методу, порівняння складності власне моделей (кількість компонентів та елементів схеми), моделювання (як задаються джерела живлення та нелінійні елементи) та результатів, що були отримані в ході моделювання (оцінка похибок).

Для цілісного уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки дає таблиці 9.

Надалі представлені варіанти використання ідеї, що пропонується, можливі напрямки застосування, основні вигоди, що може отримати користувач товару за кожним напрямком застосування, відмінності від існуючих аналогів та замінників, конкурентоспроможність та що потрібно для введення цієї ідеї.

Таблиця 9. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження нового методу моделювання ОПН та власне нової моделі ОПН	1. Електричні станції та підстанції, організації, що займаються моніторингом, відновленням та спорудженням нових ЛЕП	Використання даного методу дозволяє значно пришвидшити заміну ОПН, що вийшли з ладу, розрахувати параметри нових ОПН що потрібно встановити.
	2. Електротехнічні лабораторії	Використовувавши даний метод та модель, можна проектувати нові типи ОПН.

Після аналізу всіх цих аспектів можна з великою точністю сказати про доцільність і ефективність вводу цієї ідеї як об'єкта для стартапу.

Проведений порівняльний аналіз показників для власної ідеї за показниками: а) кращі значення (S, сильні) б) аналогічні (N, нейтральні) значення; с) гірші значення (W, слабкі); заносимо до таблиці 10[18].

Таблиця 10. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН

№ п/ п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1.	Метод апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних	Розрахунок основних електричних параметрів схеми заміщення ОПН за допомогою нового методу	Існують застарілі методи для розрахунку електричних параметрів схеми заміщення ОПН	Потреба в розробці нормативної документації на державному рівні. Багато часу для розрахунку	Використання для розрахунку інших схем	Аналогів даного методу не існує, полегшений розрахунок в цілому
2.	Використання удосконаленої спрощеної схеми технічної моделі ОПН	Розрахунок основних електричних параметрів схеми заміщення ОПН	Існують інші спрощені моделі	Відсутні держ. стандарти для даних моделей	Схему можна розрахувати за допомогою інших методів	Реалізація моделі потребує менше часу, та має менше компонентів для її побудови

За приведеним переліком слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару можна стверджувати про конкурентоспроможність методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої спрощеної схеми технічної моделі ОПН.

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (таблиця 11):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту? [18]

Таблиця 11. Технологічна здійсненність ідеї проекту впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення динамічної частотно-залежної моделі ОПН	Дану модель можливо створити за допомогою будь-якої програми призначеної для схемотехнічного моделювання.	Дана технологія наявна, але її потрібно додати	Авторам проекту вони доступні.
2	Впровадження нового методу моделювання за допомогою апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН.	Дану модель можливо створити за допомогою будь-якої програми призначеної для схемотехнічного моделювання.	Дана технологія наявна, але її потрібно додати	Авторам проекту вони доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: можна використати однакову технологію для обох ідей проекту.				

Висновок: аби впровадити запропоновані ідеї потрібно мати доступ до будь-якої програми схемотехнічного моделювання. В даному випадку використовується програма Micro-Cap Evaluation/Student Version оскільки вона наявна на ринку і безкоштовної версії достатньо аби виконати усі етапи моделювання.

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Розрахунок економічної ефективності застосування нової моделі ОПН та методу моделювання необхідно виконати з урахуванням перспективної



ціни, яка буде менше. Це підтверджує досвід виробничого об'єднання з розробки та виготовлення перетворювальних пристроїв [18].

Таблиця 12. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі

#### ОПН

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	542 млн грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Не змінюється
4	Наявність обмежень для входу	Виробники рахуватимуть алгоритм доцільним лише після порівняння моделей
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребують розробки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідома

У висновку до таблиці 12 можна відзначити, що вихід на ринок не має великих перешкод та має порівняно прості вимоги до впровадження на підприємствах.

Потенційними клієнтами є група підприємств які часто створюють сучасні типи ОПН, електростанції чи підстанції чи підприємства, що займаються ремонтом та діагностикою ЛЕП.

Таблиця 13. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Створення сучасних ОПН, з характеристиками яких інші будуть вважатися застарілими	Електричні станції та підстанції, організації, що займаються моніторингом, відновленням та спорудженням нових ЛЕП.	Поведінку клієнта формують стандарти IEEE, а також інші моделі які були створені раніше. Купують даний продукт	Використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні. Застосовувати лише в електротехніці. Використовується модель
2		Електротехнічні лабораторії.	Поведінку клієнта формують стандарти IEEE, а також інші моделі які були створені раніше. створюють новий продукт	Використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні. Застосовувати лише в електротехніці. Використовується метод
3		Виробники ОПН.	Поведінку формують рентабельність виконання нової моделі. Конструктивно збирають та створюють форму	Використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні. Застосовувати лише в електротехніці. Використовується модель

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведений аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

Таблиця 14. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Упереджене ставлення до нового продукту,	На введення в експлуатацію алгоритм потрібно більшого часу на дослідження	Створення полегшеної версії методу
2	Технологічні прориви в інших країнах, що зменшують конкурентоспроможність вітчизняної продукції	Модель може перейти на рівень застарілої при винайденні нових моделей та алгоритмів	Об'єднання з конкурентом для подальшого впровадження проекту
3	Малий % компаній, що дозволять собі піти на ризик використання нового продукту	Менша аудиторія, менший дохід	Невигідність праці

Нижче наведено фактори можливостей[18].

Таблиця 15. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Розширення зацікавлених в продукті електротехнічних лабораторій	Великі підприємці зацікавляться в новій моделі та алгоритмі	Заміна застарілих моделей на нову для створення більш сучасного обладнання
2	Зростання інтересу до нової моделі та алгоритму	Зовнішній інвестор в пошуках новинок зацікавиться моделлю та алгоритмом	Прийме в експлуатації нову модель та алгоритм за заміну застарілих

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 16)[18]

Таблиця 16. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
---	--	---

1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Великі компанії займають 80 % ринку	Можлива конкурентна змова
2. За рівнем конкурентної боротьби глобальний	ОПН використовують будь де, де потрібен захист обладнання від перенапруг	Ведучи конкуренцію на глобальному рівні, необхідно прикласти відповідні зусилля аби бути в лідерах на ринку, а саме вдосконалювати свою запропоновану модель
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Конкуренція на ринку обмежувачів перенапруг ведеться в електротехнічній галузі	Необхідно зосередитись на на копушку конкурентних переваг, що допоможуть компанії зайняти стійку позицію на ринку електротоварів.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між іншими виробниками ОПН	Необхідно модифікувати модель в цілях удосконалення, щоб моделі конкурентів вважалися застарілими
5. За характером конкурентних переваг нецінова	При виборі моделі ОПН споживач звертає увагу на електричні характеристики продукту, виробника та наявність на ринку	Головною конкурентною перевагою є унікальність даної моделі.
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Не марочна	Диференціація ОПН за мотивом отримання найнадійнішого продукту

Після проведення аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за М. Портером)

Таблиця 17. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ABB Siemens	Не зацікавленість інвесторів та покупців в економії	Компанії, що володіють сировиною та компонентами для виготовлення ОПН	Укренерго, Укрдержметростандарт	Конкурентність в даній сфері присутня, за рахунок існуючих моделей
Висновки	Збільшення товарів конкурентів зі зменшенням їхньої ціни	Вихід на ринок є. Конкурентів достатньо, можливі загрози	Постачальник диктує умови. Все залежить від умов використання	Залежить від кількості електрообладнання в регіоні	Існують, але інші моделі застарілі.

Товар має свою унікальність але кількість конкурентів достатня. Основною ідеєю, що робить його привабливим для клієнтів, являється його технічна перевага в порівнянні з іншими моделями. Саме цей продукт буде привабливим для всіх ліній електропередачі та науково дослідних центрів, що займаються створенням та дослідженням нових сучасних ОПН.

На основі аналізу конкуренції проведеного за таблицею 16, характеристик ідеї проекту, вимог до товару та факторів маркетингового середовища визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено нижче у таблиці 18

Таблиця 18. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель	За рахунок удосконаленої методики розрахунку, знижується ціна на моделювання із-за зменшення компонентів моделі
2	Врахування апроксимації вольт-амперної характеристики ОПН при моделюванні	Для розрахунку моделі використовується принципово новий метод. Конкуренти не володіють даним методом.

3	Використання матеріалів, наведених в іншій науковій літературі	Для розрахунку використовуюється відповідна наукова література, до якої можливо отримати доступ.
4	Використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників	Для розрахунку та перевірки нової моделі використовувались матеріали, запозичені з каталогів виробників-конкурентів, оскільки не має власної інформаційної бази
5	Розроблення нормативної документації	Не має документів (крім наукових статей), що підтверджують переваги даної моделі.

Обґрунтувавши фактори конкурентоспроможності порівняємо сильні та слабкі сторони проекту.

Таблиця 19. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів ABB та SIEMENS у порівнянні з новою моделлю						
			3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель	17		A	S				
2.	Врахування апроксимації вольт амперної характеристики ОПН(наукова новизна)	19	S	A					
3.	Використання матеріалів, наведених в іншій науковій літературі	5				S,A			
4.	Використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників	2					S	A	
5.	Розроблення нормативної документації	19					S	A	

В таблиці 19 проект порівнювався з конкурентами АВВ (відповідає А в таблиці) та Siemens ( S в таблиці).

Аналізуючи табл. 19 можна зробити висновки: стартап-проект має такі основні переважаючі фактори конкурентоспроможності, як мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель, врахування апроксимації вольт амперної характеристики ОПН.

Фактори конкурентоспроможності, за якими даний проект програє товарам-конкурентам як необхідність розроблення нормативної документації, які дають рейтинг товарів-конкурентів «+2» для АВВ та «+1» для Siemens.

На основі порівняльного аналізу сильних і слабких сторін впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН та факторів загроз і можливостей проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, який наведено у таблиці 20.

Таблиця. 20. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p><u>Сильні сторони:</u> Сильні сторони: Мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель. Використання наукової новизни при створенні моделі</p>	<p><u>Слабкі сторони:</u> відсутність нормативної документації на державному рівні. Необхідне створення нормативно-правової бази на загальнодержавному рівні. Відсутня науково-технічна база для розрахунку тому використовуються дані виробників конкурентів.</p>
<p><u>Можливості:</u> Розширення зацікавлених в продукті електротехнічних лабораторій Зростання інтересу до нової моделі.</p>	<p><u>Загрози:</u> Упереджене ставлення до нового продукту,</p> <p>Технологічні прориви в інших країнах, що зменшують конкурентоспроможність вітчизняної продукції</p>

	Малий % компаній, що дозволять собі піти на ризик використання нового продукту
--	--

Рекомендований час для виведення на ринок впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН у 2019-2020 роках після детального уточнення моделі.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 21. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Захист електроустаткування на станціях та підстанціях	Швидко	Товар має великий попит	Можлива	Слабо ускладнений: необхідні патенти на продукт, переваги у затратах виробництва
2	Науково-дослідні центри	Найшвидша	Товар має великий попит	Можлива	Слабо ускладнений: доступ до ресурсів
Які цільові групи обрано: вибрано першу цільову групу електричні станції та підстанції					

Сформуємо базову стратегію розвитку для роботи в обраних сегментах ринку(табл. 22)



Таблиця 22. Визначення базової стратегії розвитку

п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Провести з можливими реалізаторами переговори з метою підбору найкращої комбінації умов угоди	Можливість залучення нових споживачів за рахунок бази до якої можливо приєднатися	Мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель. Використання наукової новизни при створенні моделі	Стратегія спеціалізації

Базовою стратегією розвитку вибрано стратегія спеціалізації. Нижче наведено визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 23. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Так, так	Ні	Стратегія нішеру

Базовою стратегією конкурентної поведінки взято стратегію нішер.

Таблиця 24. Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Уніфікованість, гнучкість, легкість у налаштуванні	Стратегія спеціалізації	Мінімізація витрат на моделювання та полегшена модель. Використання наукової новизни при створенні моделі	Економія, унікальність, легкість

Напрямок розвитку полягає у створенні продукту який відрізняється від аналогів, якщо такі існують, та удосконалення його на всіх платформах, що можуть використовувати даний продукт.

#### 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у табл. 1\*\* підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 25. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Потреба у надійних пристроях захисту	Переваги при створенні нових моделей, ремонті та заміні застарілих ОПН	Аналоги існують, але застарілі та з меншою ефективністю

Далі розроблено трирівнева маркетингова модель товару.

Таблиця 26. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Обмежувачі перенапруг – пристрій для захисту електрообладнання . Потреба споживача у надійних пристроях захисту та переваги при створенні нових моделей, ремонті та заміні застарілих ОПН		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Функціональне призначення – ОПН призначенні для захисту обладнання від перенапруг (розташовані на землі чи підвісні) (маса, розміри,кількість елементів) розраховується параметрично відповідно до ПУЕ)	1 М	1. Пр, Тх ,Тл, О
	2. Довговічність – як довго ОПН буде функціонувати (розраховується параметрично відповідно до ПУЕ)	2 М	2. Пр, Тх ,Тл, О
	3. Надійність (розраховується за ПУЕ)	3 М	3. Пр, Тх ,Тл, О
	4. Технологічність ( трудомісткість виготовлення і собівартість товару знижено за рахунок зменшення кількості елементів)	4 М	4. Пр, Тх ,Тл, О
	Якість: якість даної моделі підтверджено в магістерській дисертації за рахунок схемо-технічного моделювання та ПУЕ		
	Пакування: запакований ОПН перевозиться в необхідному пакуванні для крихкого (для фарфору ,скла, полімерна)у коробці ,обмотаний стретч плівкою та засипаний пінопластом .		
	Марка: назва організації NSA-PROTECTION, обмежувач перенапруг		
III. Товар із підкріпленням	Обмежувач перенапруг (фарфорова покришка з захисною колоною)		
	Обмежувач перенапруг з додатковими кріпленнями на опору чи встановлення на землю		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: алгоритм моделювання та розрахунку даного обмежувача перенапруг вважатиметься комерційною та технологічною таємницею. Та буде захищений відповідними нормативними документами та патентами.			

Сформувавши маркетингову модель товару слід відмітити, що проект буде захищено від копіювання бо алгоритм моделювання та розрахунку даного обмежувача перенапруг вважатиметься комерційною та технологічною таємницею. Та буде захищений відповідними нормативними документами та патентами.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститутути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів[18].

Таблиця 27. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	До 15 000 грн	До 15 000 грн	Доходи споживачів (на прикладі УКРЕНЕРГО за січень-березень 2018 до 1,2 млрд грн)	Від 600 грн до 15 000 грн (в залежності від типу ОПН)

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників[18].

Таблиця 28. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	На промисловому ринку менша кількість покупців, ніж на споживчому, але вони значно потужніші, тому втрата одного промислового споживача для продавця є більш значною, ніж втрата індивідуального споживача	Встановлення безпосередніх контактів із споживачами та покупцями товарів, транспортування товару, участь у формуванні ціни на товари, що продаються, Маркетингові дослідження	Канал збуту однорівневий	Традиційна система збуту

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів .

Таблиця 29. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Поведінку клієнта формують стандарти ІЕЕЕ, а також інші моделі які були створені раніше.	Формальні та неформальні канали комунікацій (інтернет та	Мінімізація витрат на моделювання та	Інформаційне (повідомлення про новий ОПН, формування	Головною структурою рекламного звернення буде з девізом про

	Купують даний продукт Будуть використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні. Застосовувати лише в електротехніці. Використовується модель	онлайн магазини, технічні виставки)	полегше на модель. Використання наукової новизни при створенні моделі	знань про марку і її виробника), увещувальну (формування сприятливого думки та переваги)	надійність моделі ОПН. Формою рекламного звернення буде представлення професійної майстерності Стиль науково-професійний
--	--	-------------------------------------	--	--	--

#### 4.. Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто етапи впровадження методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН.

Оцінивши попит на ринку було виявлено, що аналоги даної моделі є, але вони частково застаріли та уступають в ефективності новому алгоритму розрахунку та удосконаленій моделі ОПН.

При розробленні нормативно правової бази відповідно до міжнародних стандартів можливе впровадження даного проекту.

Рекомендована комерціалізація методу апроксимації вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних та використання удосконаленої моделі ОПН у 2019 -2020 роках

## ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації проведено загальний опис високовольтного апарату – обмежувача перенапруг нелінійного. Здійснено ряд дослідів пов'язаних моделюванням схемо-технічних моделей ОПН, які запропоновані на кафедрі ТЕВН та проведено порівняльний аналіз з існуючими моделями обмежувачів перенапруг нелінійних.

Запропоновані моделі на рівні з їх застарілими аналогами, показують задовільні результати, які можна використовувати для розрахунку обмежувачів перенапруг.

Перевагою методу апроксимації вольт-амперної характеристикою являється можливість використання даного методу під час розрахунку реальних обмежувачів перенапруг. Проте дана процедура розрахунку потребує достатньо велику кількість часу.

Проведено багатоваріантний аналіз випробних моделей ОПН залишкової напруги. Отримані значення залишкової напруги між виводами ОПН.

Схемотехнічне моделювання обмежувачів перенапруг необхідне для того, щоб правильно відтворити принцип роботи даного апарату при грозових та комутаційних перенапруг та максимально точно полегшити процес розрахунку параметрів ОПН.

### Список використаних джерел

1. Дмитриев М. В. Защита изоляции воздушных линий от перенапряжений [Электронный ресурс] / Михаил Дмитриев. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://mvdm.ru/wp-content/uploads/2015/05/Dmitriev3line.pdf>.
2. Назначение и расшифровка ограничителей перенапряжений [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.energo-plan.ru/production/item.1953.html>.
3. Surge Arrester Buyers Guide Edition 7.3[Text]. // ABB Group. – 2015. – с. 36–44.
4. Дмитриев М. В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ [Текст] / Михаил В. Дмитриев. – Санкт-Петербург, 2009. – 92 с. – (Политехн. ун-та). – ББК.31.241Д53).
5. АББ Ограничители перенапряжений нелинейные [Электронный ресурс] // SE-771 80. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: [www.abb.com/arrestersonline](http://www.abb.com/arrestersonline).
6. Бохан А. Н. Динамічна модель обмежувача напруг нелінійного для дослідження внутрішніх перенапруг в розподільчих мережах [Електронний ресурс] / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок // Вісник Гомельського державного технічного університету. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-model-ogranichitelya-perenapryazheniya-nelineynogo-dlya-issledovaniya-vnutrennih-perenapryazheniy-v>.
7. Бржезицький В. О. Апроксимація вольт-амперної характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних / В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко, Є. О. Троценко, Д. С. Крисенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 169-176.
8. Коваль А. А. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг / А. А. Коваль, О. Р. Проценко, Є. О. Троценко // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2016. – С. 354-356.
9. Троценко Є. О. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг в Micro-Cap / Є. О. Троценко, В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – № 6/1 (32). – С. 26-30.



10. Trotsenko Ye. Study of surge arrester model under influence of various current pulses / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 1/1 (33). – P. 44-48. doi: 10.15587/2312-8372.2017.92244
11. Trotsenko Ye. Effect of piecewise linear current waveforms on surge arrester residual voltage / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 2/1 (34). – P. 25-31. doi: 10.15587/2312-8372.2017.97507
12. Brzhezitsky V. Analysis and comparison of metal-oxide surge arrester models / V. Brzhezitsky, Ye. Trotsenko, Ya. Haran // Technology audit and production reserves. – 2017. – № 6/1 (38). – С.40-46. doi: 10.15587/2312-8372.2017.117836
13. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Філіпп Г. Д. Дослідження спрощеної моделі нелінійного обмежувача перенапруг // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2017. – С.612-615.
14. Pablo Mourente Miguel. Comparison of Surge Arrester Models / Pablo Mourente Miguel. // IEEE. – 2013. – С. 1–9.
15. IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. // IEEE Std C62.2.2009. – 3. – С.115–116.
16. Effectiveness of installing two pairs of distribution surge arresters in parallel / Hitoshi Sugimoto,, Akira Asakawa, Shigeru Yokoyama, Kazuo Nakada. // High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999. – С. 1–4.
17. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Яременко Д. С. Оцінка форми струмів, що протікають крізь нелінійний обмежувач перенапруг при грозових перенапругах // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2017. – С.616-618.
18. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша, Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 30 с.